

**VŠB - Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra informatiky**

**Frekvenční charakteristiky útlumů**  
**Frequency Attenuation Characteristics**

## Zadání bakalářské práce

Student: **Radim Daněček**

Studijní program: B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor: 2612R025 Informatika a výpočetní technika

Téma: **Frekvenční charakteristiky útlumů**  
**Frequency Attenuation Characteristics**

### Zásady pro vypracování:

Přenosová média a jejich vlastnosti mají podstatný vliv na kvalitu přenášených signálů. Mezi základní přenosové parametry se řadí jejich útlum. Cílem bakalářské práce je vytvoření programu pro výpočet frekvenčních charakteristik zbytkového a provozního útlumu pro používaná média v přístupových sítích a jeho experimentální ověření.

Práce bude obsahovat:

1. Teoretický úvod a rozbor používaných útlumů.
2. Sestavení matematického modelu pro výpočty frekvenčních charakteristik útlumů vedení při zadaných parametrech délky vedení a typu média.
3. Vytvoření algoritmu matematického modelu a jeho programová realizace.
4. Porovnání výsledků z matematického modelu s naměřenými průběhy na reálných médiích.

### Seznam doporučené odborné literatury:

SVOBODA, Jaroslav, ŠIMÁK, Boris, ZEMAN, Tomáš. *Základy teleinformatiky*. 1. vyd. Praha : Vydavatelství ČVUT, 2000. 192 s. ČVUT. ISBN 80-01-01767-2.

SVOBODA, Jaroslav, et al. *Telekomunikační technika - díl 1. : Zprávy, signály, přenosová prostředí*. 1. vyd. Praha : Hüthig, Beneš, 1998. 136 s. ISBN 80-901936-3-3.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Iva Petříková**

Datum zadání: 19.11.2010

Datum odevzdání: 04.05.2012



doc. Dr. Ing. Eduard Sojka  
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě 25.4 2012

*Pavla Dmíčovská*  
.....

Touto cestou bych rád poděkoval vedoucí bakalářské práce,  
paní Ing. Ivě Petříkové, především za konzultace  
a odborné rady, které jsem mohl zúročit při sestavování  
matematického modelu a psaní tohoto textu.

# Abstrakt a klíčová slova

Tato bakalářská práce se zabývá přenosovými médii a jejich vlastnostmi, které mají podstatný vliv na kvalitu přenášených signálů. Mezi základní přenosové parametry, které nás u telekomunikačních médií zajímají, je útlum. Cílem práce je sestavit matematický model pro výpočty frekvenčních charakteristik vedení a provést jeho programovou realizaci. V úvodu nás práce seznamuje se sdělovacím vedením, jeho parametry a používanými útlumy v telekomunikační technice. Dále objasňuje sestavení matematického modelu, který poté implementuje do formy počítačového programu. V další části experimentálně ověřuje a porovnává dosažené výsledky s matematickým modelem.

**Klíčová slova:** telekomunikační vedení, provozní útlum, zbytkový útlum, programovací jazyk C#, vlnová impedance, měrná míra přenosu, primární parametry, sekundární parametry, vstupní impedance, ZedGraph

## Abstract

This thesis deals with the transmission media and their properties which have a significant impact on the quality of transmitted signals. The basic transmission parameters, which we are interested in telecommunications media, is depression. The aim is to build a mathematical model for calculating the frequency characteristics of leadership and implement its program implementation. In the introduction, our work introduces the leadership of the media, its parameters and attenuation used in telecommunications technology. It also makes the assembly of a mathematical model, which then implements the form of a computer program. In the next section experimentally verified and compared the results with the mathematical model.

**Key words:** telecommunications line, operating loss, residual loss, C # programming language, wave impedance, transmission rate measurement, the primary parameters, secondary parameters, input impedance, ZedGraph

# Seznam použitých veličin, symbolů a zkratek

argument vlnové impedance	$\varphi_0$	[°]
argument měrné míry přenosu	$\varphi_y$	[°]
C Sharp	$C\#$	
délka vedení	$l$	[km]
délka vlny	$\lambda$	[km]
frekvence	$f$	[Hz]
impedance zátěže	$\overline{Z}_2$	[Ω]
kapacita	$C$	[F]
měrná míra přenosu	$\bar{\gamma} = \alpha + j \cdot \beta$	[km <sup>-1</sup> ]
měrný fázový posuv	$\beta$	[rad.km <sup>-1</sup> ]
měrný útlum	$\alpha$	[dB.km <sup>-1</sup> ];[Np.km <sup>-1</sup> ]
odpor	$R$	[Ω]
podélná impedance	$\bar{z} = R + j \cdot \omega \cdot L$	[Ω.km <sup>-1</sup> ]
provozní útlum	$A$	[dB]
příčná admitance	$\bar{y} = G + j \cdot \omega \cdot C$	[S.km <sup>-1</sup> ]
vlnová impedance	$\overline{Z}_0$	[Ω]
vstupní impedance	$\overline{Z}_1$	[Ω]
vstupní napětí dvojbranu	$\overline{U}_1$	[V]
vstupní proud	$\overline{I}_1$	[A]
výstupní napětí dvojbranu	$\overline{U}_2$	[V]
výstupní proud dvojbranu	$\overline{I}_2$	[A]
zbytkový útlum	$A_Z$	[dB]

# Seznam obrázků

Obr. 1: Schéma dvojbranu .....	3
Obr. 2: Dvojbran při $Z_1 = Z_2$ je příčně souměrný .....	4
Obr. 3: Základní představa homogenního vedení a náhradní schéma jeho elementu .....	5
Obr. 5: Frekvenční závislost absolutní hodnoty vlnové impedance kabelu TCEPKPFLE 15x4x0,4 mm .....	17
Obr. 4: Frekvenční závislost absolutní hodnoty vlnové impedance kabelu SYKFY 2x2x0,5 mm .....	17
Obr. 7: Frekvenční závislost absolutní hodnoty měrné míry přenosu kabelu TCEPKPFLE 15x4x0,4 mm .....	21
Obr. 6: Frekvenční závislost absolutní hodnoty měrné míry přenosu kabelu SYKFY 2x2x0,4 mm .....	21
Obr. 8: Microsoft Visual Studio 2010 .....	26
Obr. 9: Zpracování naměřených hodnot pro výpočet provozního útlumu pomocí programu .....	27
Obr. 10: Zpracování naměřených hodnot pro výpočet zbytkového útlumu pomocí programu .....	28
Obr. 11: Výpočet provozního útlumu z matematického modelu .....	28
Obr. 12: Výpočet zbytkového útlumu z matematického modelu .....	29
Obr. 13: Srovnání naměřených a vypočtených hodnot modelu .....	29
Obr. 14: Schéma pro měření provozního a zbytkového útlumu .....	31
Obr. 15: Srovnání naměřených a vypočtených hodnot provozního a zbytkového útlumu pomocí programu .....	33
Obr. 17: Srovnání naměřených a vypočtených hodnot provozního a zbytkového útlumu pomocí programu .....	34
Obr. 16: Srovnání naměřených a vypočtených hodnot provozního a zbytkového útlumu pomocí programu .....	34
Obr. 19: Srovnání naměřených a vypočtených hodnot provozního a zbytkového útlumu pomocí programu .....	35
Obr. 18: Srovnání naměřených a vypočtených hodnot provozního a zbytkového útlumu pomocí programu .....	35
Obr. 20: Srovnání naměřených a vypočtených hodnot provozního a zbytkového útlumu pomocí programu .....	36

# Seznam tabulek

Tabulka 1: Frekvenční závislost vlnové impedance kabelů SYKFY 2x2x0,5 mm a TCEPKPFLE 15x4x0,4 mm .....	18
Tabulka 2: Měrná míra přenosu $\gamma$ , kabelů SYKFY 2x2x0,4 mm a TCEPKPFLE 15x4x0,4 mm .....	22
Tabulka 3: Vypočtené hodnoty provozního a zbytkového (matematický model), kabel SYKFY 2x2x0,5 mm, $l = 250$ m .....	25
Tabulka 4: Naměřené hodnoty provozního a zbytkového útlumu, kabel SYKFY 2x2x0,5 mm .....	32



# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Sdělovací vedení, jeho parametry a útlumy .....</b>	<b>2</b>
2.1.	Dvojbrany .....	2
2.1.1.	Rozdělení dvojbranů .....	4
2.2.	Homogenní vedení .....	5
2.3.	Primární a sekundární parametry vedení .....	6
2.4.	Vlnová impedance .....	7
2.5.	Měrná míra přenosu .....	9
2.6.	Vstupní impedance .....	11
2.7.	Útlumy používané v telekomunikační technice .....	12
<b>3</b>	<b>Matematický model a jeho programová realizace .....</b>	<b>15</b>
3.1.	Vlnová impedance .....	15
3.2.	Měrná míra přenosu .....	19
3.3.	Výpočet vstupní impedance .....	23
3.4.	Vytvoření algoritmu matematického modelu .....	24
3.5.	Programová realizace .....	26
3.5.1.	Prostředky k realizaci programu .....	26
3.5.2.	Programovací jazyk C# .....	26
3.5.3.	ZedGraph .....	27
3.5.4.	Výstupy programu .....	27
<b>4</b>	<b>Experimentální ověření matematického modelu .....</b>	<b>30</b>
4.1.	Měření útlumů .....	30
4.1.1.	Měření frekvenční charakteristiky provozního útlumu .....	30
4.1.2.	Měření frekvenční charakteristiky zbytkového útlumu .....	31
<b>5</b>	<b>Porovnání modelu s naměřenými hodnotami .....</b>	<b>33</b>
<b>6</b>	<b>Zhodnocení a závěr .....</b>	<b>37</b>
	<b>Literatura .....</b>	<b>39</b>
	<b>Seznam příloh .....</b>	<b>40</b>

# 1 Úvod

Telekomunikační vedení se v dnešní době používají pro stále vyšší kmitočtová pásma. V těchto vyšších pásmech se uplatňuje nárůst útlumu, který má rozhodující podíl na dosažitelné přenosové rychlosti a kvalitě signálu určité trasy. Tato práce seznamuje čtenáře s charakteristickými parametry homogenního vedení, které se popisují primárními (odpor  $R$  [ $\Omega/\text{km}$ ], kapacita  $C$  [ $\text{F}/\text{km}$ ], svod  $G$  [ $\text{S}/\text{km}$ ] a indukčnost  $L$  [ $\text{H}/\text{km}$ ]) a sekundárními parametry (vlnová impedance  $Z_0$  [ $\Omega$ ] a měrná míra přenosu  $\gamma$  [-]), závislými na kmitočtu. Přenosové vlastnosti daného typu vedení lze plně charakterizovat pomocí sekundárních parametrů. U dálkových sdělovacích vedení se právě sekundární parametry udávají nejčastěji, pro posouzení jejich kvality.

Druhá kapitola popisuje dvojbrany a jejich rozdělení podle různých hledisek. Neopomíná se zmínit o homogenním vedení, uvádí jeho základní představu a náhradní schéma jeho elementu. Dále se podrobněji zabývá sekundárními parametry vedení, u kterých odvozuje výsledné vztahy pro jejich absolutní hodnoty a frekvenční závislosti fáze. Následuje objasnění teorie vstupní impedance vedení. Závěrem kapitoly definuje útlumy, používané v přenosové technice a jejich obecnou definici. Odvozením a vzorci popisuje provozní, vložný a zbytkový útlum.

Třetí kapitola se zabývá sestavením matematického modelu. Na základě primárních a sekundárních parametrů měřených kabelů (SYKFY 2x2x0,5 mm a TCEPKPFLE 15x4x0,4 mm), odvozuje výsledný vzorec pro výpočet provozního a zbytkového útlumu. Tento vzorec implementuje do formy počítačového programu, který realizuje v programovacím jazyku C#. Program vyvíjí v Microsoft Visual Studiu 2010, k zobrazení grafů využívá knihovnu ZedGraph. Předvádí funkci programu a jeho rozhraní na konkrétním kabelu, jeho typu a délce.

Následující kapitola číslo čtyři, rozebírá vlastní praktickou část, tj. měření dvou výše uvedených kabelů různých délek v laboratoři. Popisuje zde použité postupy pro zjištění provozního a zbytkového útlumu. Každé měření je doplněno o slovní popis a schéma postupu, jakožto i o příklad výpočtu daného útlumu.

Pátá kapitola srovnává naměřené a vypočtené hodnoty jednotlivých útlumů. Srovnání je prezentováno v podobě grafů prostřednictvím vytvořeného programu.

Poslední kapitola šest hodnotí dosažené výsledky a rozebírá vhodnost použitých postupů pro výpočty jednotlivých kabelů různých délek. Závěrem uvádíme přínosy a náměty na rozšíření této práce.

## 2 Sdělovací vedení, jeho parametry a útlumy

### 2.1. Dvojbrany

V praxi se velmi často vyskytují obvody (části obvodů, prvky obvodů), které jsou k jiným částem obvodů připojeny dvěma dvojicemi svorek - dvěma branami. Přitom ani není důležité, jak jsou tyto obvody "uvnitř" složité - vnitřní poměry nás vlastně vůbec nezajímají, pokud umíme jednoznačně definovat funkční závislosti mezi obvodovými veličinami bran. Hovoříme o dvojbranu a tento dvojbranový přístup může velmi zefektivnit teoretickou analýzu elektrických obvodů, významně klesá počet rovnic nutný k modelování obvodu.

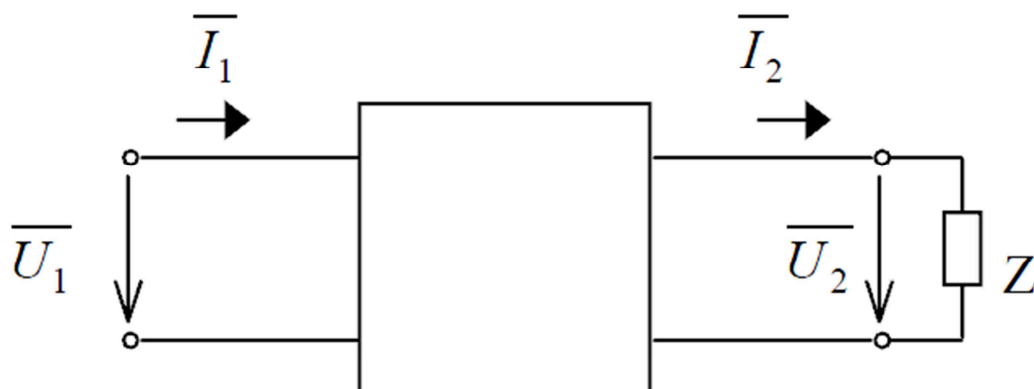
Bývá zvykem označovat jednu bránu jako bránu vstupní a druhou bránu jako bránu výstupní. Vhodnější je však asi hovořit o bráně 1 a bráně 2, protože obecně nemusí být vždy zcela jisté, která bude vlastně vstupem, a která výstupem.

Základní konvence "branových" veličin je uvedena na obr. 1. Jedná se o konvenci spotřebičovou.

Kladný součet činných výkonů brány 1 a brány 2 tak představuje spotřebu energie dvojbranem, jedná se o dvojbran pasivní.

Záporný součet činných výkonů brány 1 a brány 2 tak představuje dodávání energie z dvojbranu do okolního obvodu - jedná se o dvojbran aktivní.

Nulový součet činných výkonů brány 1 a brány 2 představuje hraniční stav, energetická bilance je vyvážená - jedná se o dvojbran bezeztrátový.



Obr. 1: Schéma dvojbranu

Z obr. 1 je zřejmé, že k popisu dvojbranu máme čtyři veličiny, dvě branová napětí a dva branové proudy. Budeme vytvářet (hledat) funkční závislosti dvou veličin (závislých) na dvou veličinách nezávislých. Dvě nezávislé veličiny ze čtyř možností lze vybrat právě

$$\binom{4}{2} = 6 \quad (1)$$

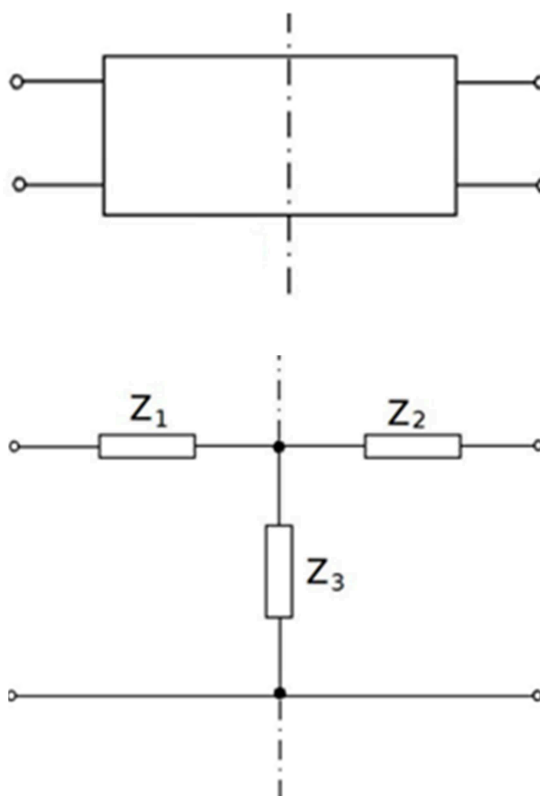
způsoby (kombinace). Existuje proto právě 6 možností jak dvojbran popsat. Je zřejmé, že mezi těmito popisy musí být jednoznačné vztahy, protože analýza obvodů musí být vždy jednoznačná. Dvojbrany vysvětleny dle[3].

### 2.1.1. Rozdělení dvojbranů

Dvojbrany lze rozdělit podle různých hledisek. Důležité je zejména dělení na dvojbrany pasivní a aktivní, (podélně) souměrné a nesouměrné, reciproční (neobsahují řízené zdroje) a nerekiproční, bilaterální (přenos energie je možný oběma směry), unilaterální (přenos energie je možný jen jedním směrem) a nonlaterální (přenos energie není možný).

Je-li dvojbran složen z pasivních prvků a řízených zdrojů, může se za jistých podmínek chovat jako zdroj, ale sám nemůže trvale dodávat činnou energii. Takový aktivní dvojbran se nazývá neautonomní. (Autonomní dvojbran je aktivní dvojbran, který může sám dodávat činnou energii; obsahuje tedy alespoň jeden nezávislý zdroj.)

Vztahy mezi vnějšími napětími a proudy neautonomního dvojbranu lze vyjádřit pomocí impedančních, admitančních, (postupně) kaskádních, zpětně kaskádních, sériově paralelních a paralelně sériových rovnic, tj. šesti způsoby. Základní rozdělení dvojbranů dle [4].



Obr. 2: Dvojbran při  $Z_1 = Z_2$  je příčně souměrný

## 2.2. Homogenní vedení

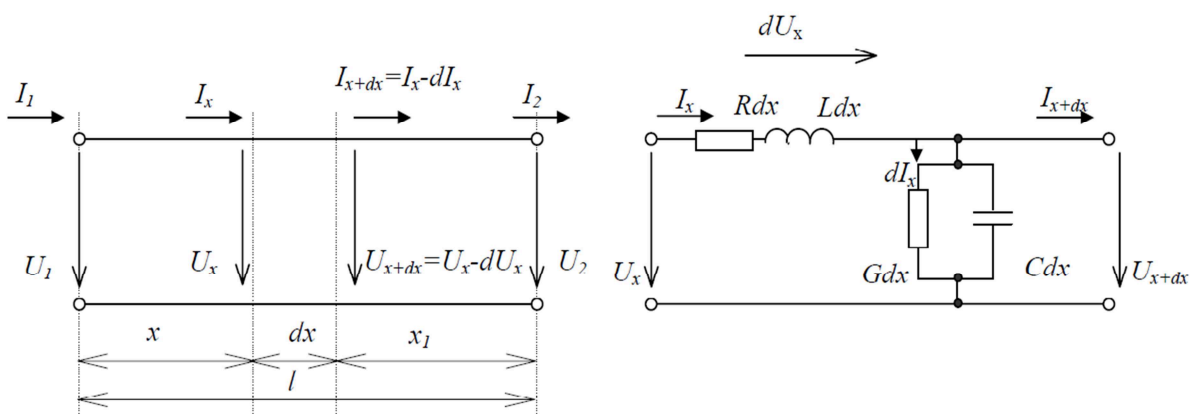
Teorie homogenního vedení patří v současné době k základním partiím elektrotechniky. I když se k jejímu odvozování užívá dnes několika různých přístupů, nejnázornější je způsob, vycházející z náhradního schématu elementu vedení znázorněného na obr. 3. Jak vyplývá z obr. 3, je možno celé telekomunikační vedení i jeho části považovat z hlediska přenosu signálu za dvojbran. Veličiny na vstupu jsou označené indexem „1“ a na výstupu indexem „2“.

Základním předpokladem pro toto odvození je uvažování jednovlnného procesu, probíhajícího podél dvou vodičového vedení a tedy zanedbání vlivu země.

Uvažujeme, že element dvou vodičového vedení o délce  $dx$  má parametry  $R dx$ ,  $L dx$ ,  $C dx$  a  $G dx$ . Celé vedení si pak můžeme představit jako řetěz nekonečného počtu těchto elementárních dvojbranů.

Veličiny na začátku elementu označíme  $I_x$ ,  $U_x$ ,

Veličiny na konci elementu označíme  $I_{x+dx}$ ,  $U_{x+dx}$ .



Obr. 3: Základní představa homogenního vedení a náhradní schéma jeho elementu

Teorie homogenního vedení dle [6].

Parametry v podélném směru určují podélnou impedanci

$$\bar{z} = R + j \cdot \omega \cdot L \quad [\Omega \cdot km^{-1}] \quad (2)$$

Analogicky příčná admitance

$$\bar{y} = G + j \cdot \omega \cdot C \quad [S \cdot km^{-1}] \quad (3)$$

Při přenosu harmonického signálu vedením dochází průchodem proudu podélnou impedancí elementu vedení k úbytku napětí.

$$-d\bar{U}_x = R \cdot dx \cdot \bar{I}_x + j \cdot \omega \cdot L \cdot dx \cdot \bar{I}_x = (R + j \cdot \omega \cdot L) \cdot \bar{I}_x \cdot dx = \bar{z} \cdot \bar{I}_x \cdot dx \quad (4)$$

Příčná větev elementu vedení způsobuje úbytek proudu

$$-d\bar{I}_x = G \cdot dx \cdot \bar{U}_x + j \cdot \omega \cdot C \cdot dx \cdot \bar{U}_x = (G + j \cdot \omega \cdot C) \cdot \bar{U}_x \cdot dx = \bar{y} \cdot \bar{U}_x \cdot dx \quad (5)$$

Závěrem uvádíme vztahy pro výpočet napětí a proudu na začátku vedení ze známých hodnot na konci vedení – tzv. **kaskádové rovnice vedení**:

$$\bar{I}_1 = \frac{\bar{U}_2}{\bar{Z}_0} \sinh(\bar{\gamma} \cdot l) + \bar{I}_2 \cosh(\bar{\gamma} \cdot l) \quad (6)$$

$$\bar{U}_1 = \bar{U}_2 \cosh(\bar{\gamma} \cdot l) + \bar{Z}_0 \bar{I}_2 \sinh(\bar{\gamma} \cdot l) \quad (7)$$

### 2.3. Primární a sekundární parametry vedení

Charakteristickými parametry homogenního vedení jsou tzv. primární parametry. Jsou to měrný odpor  $R$  [ $\Omega/km$ ], měrná indukčnost  $L$  [ $mH/km$ ], měrná kapacita  $C$  [ $nF/km$ ] a měrný svod  $G$  [ $\mu S/km$ ]. Primární parametry se vztahují k jednotkové délce vedení.

U homogenního vedení jsou primární parametry konstantní podél celého vedení, u lineárního vedení nezávisí na proudu (napětí). S rostoucím kmitočtem silně rostou –  $R$  vlivem skin efektu, vířivých proudů a efektu blízkosti,  $G$  vlivem rostoucích ztrát v dielektriku. Primární parametry potřebujeme znát při výrobě kabelu a  $R$  a  $C$  také během montáže. U hotových vedení se o tyto parametry prakticky nezajímáme.

## 2.4. Vlnová impedance

Pro sledování přenosových vlastností homogenního vedení se zavádějí sekundární parametry vedení. Poměr napětí  $U$  a proudu  $I$  v každém bodě homogenního vedení je stálý a nazývá se **vlnová impedance vedení  $Z_0$** .

Pomocí rovnic (4) a (5) tedy odvodíme:

$$\overline{Z}_0 = \frac{\overline{U}_x}{\overline{I}_x} = \frac{d\overline{U}_x}{d\overline{I}_x} = \frac{(R + j \cdot \omega \cdot L) \cdot \overline{I}_x \cdot dx}{(G + j \cdot \omega \cdot C) \cdot \overline{U}_x \cdot dx} \quad (8)$$

Dosazením za  $dU_x$  a  $dI_x$  můžeme vztah upravit:

$$\frac{\overline{U}_x}{\overline{I}_x} = \frac{(R + j \cdot \omega \cdot L) \cdot I_x \cdot dx}{(G + j \cdot \omega \cdot C) \cdot \overline{U}_x \cdot dx} \quad (9)$$

$$\left( \frac{\overline{U}_x}{\overline{I}_x} \right)^2 = \frac{(R + j \cdot \omega \cdot L)}{(G + j \cdot \omega \cdot C)} \quad (10)$$

$$\overline{Z}_0^2 = \frac{(R + j \cdot \omega \cdot L)}{(G + j \cdot \omega \cdot C)} \quad (11)$$

Pro výpočet dostáváme vzorec, ze kterého určujeme  $Z_0$  z primárních parametrů vedení:

$$\overline{Z}_0 = \sqrt{\frac{(R + j \cdot \omega \cdot L)}{(G + j \cdot \omega \cdot C)}} \quad [\Omega] \quad (12)$$

Komplexní tvar vlnové impedance:

$$\overline{Z}_0 = \sqrt{\frac{(R + j \cdot \omega \cdot L)}{(G + j \cdot \omega \cdot C)}} = \sqrt{\frac{\overline{Z}}{\overline{Y}}} = \sqrt{\frac{Z \cdot e^{j\varphi_Z}}{Y \cdot e^{j\varphi_Y}}} = \sqrt{\frac{Z}{Y}} \cdot e^{\frac{j(\varphi_Z - \varphi_Y)}{2}} = Z_0 \cdot e^{j\varphi_0} \quad (13)$$

kde  $Z_0$  je modul vlnové impedance neboli absolutní hodnota vlnové impedance, který udává poměr velikosti napěťové a proudové vlny v každém místě homogenního vedení, a  $\varphi_0$  je argument vlnové impedance, který udává rozdíl mezi fázemi napěťové a proudové vlny v každém místě homogenního vedení.



Absolutní hodnotu vlnové impedance vypočteme ze vztahu:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{Z}{Y}} = \sqrt{\frac{\sqrt{R^2 + \omega^2 \cdot L^2}}{\sqrt{G^2 + \omega^2 \cdot C^2}}} = \sqrt[4]{\frac{R^2 + \omega^2 \cdot L^2}{G^2 + \omega^2 \cdot C^2}} \quad (14)$$

Frekvenční závislost vlnové impedance vyjadřuje vztah:

$$\varphi_0 = \frac{1}{2} \cdot (\varphi_Z - \varphi_Y) = \frac{1}{2} \cdot \left( \arctan \frac{\omega \cdot L}{R} - \arctan \frac{\omega \cdot C}{G} \right) \quad (15)$$

Vlnová impedance vedení je dána primárními parametry vedení a kmityčtem a je **nezávislá na délce**.

## 2.5. Měrná míra přenosu

Relativní změna napětí a proudu v každém elementu vedení vztažená na jednotkovou délku vedení je konstantní a nazývá se **měrná míra přenosu**.

Odvodíme vztah z relativní změny proudu vztažené k jednotkové délce, dosazením za  $d\bar{I}_x$  ze vztahu (5):

$$\begin{aligned}\bar{\gamma} &= \frac{d\bar{I}_x}{\bar{I}_x \cdot dx} = \frac{(G + j \cdot \omega \cdot C) \cdot \bar{U}_x \cdot dx}{\bar{I}_x \cdot dx} = (G + j \cdot \omega \cdot C) \cdot \bar{Z}_0 = (G + j \cdot \omega \cdot C) \cdot \sqrt{\frac{R + j \cdot \omega \cdot L}{G + j \cdot \omega \cdot C}} = \\ &= \sqrt{(R + j \cdot \omega \cdot C) \cdot (G + j \cdot \omega \cdot C)} = \sqrt{\bar{Z} \cdot \bar{Y}}\end{aligned}\quad (16)$$

Měrná míra přenosu  $\gamma$  je tedy komplexní veličina, která závisí na primárních parametrech a kmítočtu

$$\begin{aligned}\bar{\gamma} &= \sqrt{\bar{Z} \cdot \bar{Y}} = \sqrt{z \cdot e^{j\varphi_z} \cdot y \cdot e^{j\varphi_y}} = \sqrt{z \cdot y \cdot e^{j(\varphi_z + \varphi_y)}} = \\ &= \sqrt{z \cdot y} \cdot e^{j \frac{(\varphi_z + \varphi_y)}{2}} = \gamma \cdot e^{j\varphi_\gamma} = \gamma \cdot (\cos \varphi_\gamma + j \cdot \sin \varphi_\gamma) = \alpha + j \cdot \beta\end{aligned}\quad (17)$$

$\varphi_\gamma$  – argument měrné míry přenosu

$\alpha$  – reálná část měrné míry přenosu – měrný útlum (jednotka Np. km<sup>-1</sup>, dB.km<sup>-1</sup>)

Pro vzájemný převod platí:

$$\text{Np} = 8,686 \text{ dB}$$

$$\text{dB} = 0,115 \text{ Np}$$

$\beta$  – imaginární část měrné míry přenosu – měrný fázový posuv (jednotka rad/km)

Absolutní hodnota měrné míry přenosu vyjadřuje vztah:

$$\gamma = \sqrt{z \cdot y} = \sqrt[4]{R^2 + \omega^2 \cdot L^2} \cdot \sqrt[4]{G^2 + \omega^2 \cdot C^2}\quad (18)$$

Frekvenční závislost měrné míry přenosu vyjadřuje vztah:

$$\varphi_Y = \frac{1}{2} \cdot (\varphi_Z + \varphi_Y) = \frac{1}{2} \cdot \left( \arctan \frac{\omega \cdot L}{R} + \arctan \frac{\omega \cdot C}{G} \right) \quad (19)$$

Měrný fázový posuv  $\beta$  udává zpoždění fáze šířící se vlny na jednotku délky (užívá se jednotka km). Zpoždění fáze o  $360^\circ$  ( $2\pi$ ) nastane ve vzdálenosti jedné délky vlny  $\lambda$ , tj.

$$\beta \lambda = 2\pi \quad (20)$$

a tudíž

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} \quad [km] \quad (21)$$

Proto se měrný fázový posuv někdy nazývá konstanta vlnové délky. Její hodnota je závislá na typu a konkrétních parametrech vedení. Rychlost, jakou se šíří fáze postupující harmonické vlny, je dána tzv. fázovou rychlostí šíření  $v_f$ , která se vypočte dle vztahu:

$$v_f = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot f = \frac{2\pi f}{\beta} = \frac{\omega}{\beta} \quad (22)$$

## 2.6. Vstupní impedance

Obecně pro vstupní impedanci platí, že se rovná podílu vstupního napětí a vstupního proudu:

$$\overline{Z}_1 = \frac{\overline{U}_1}{\overline{I}_1} \quad (23)$$

Po dosazení kaskádových rovnic vedení (6) a (7) do předchozího vztahu dostáváme:

$$\overline{Z}_1 = \frac{\overline{U}_1}{\overline{I}_1} = \frac{\overline{U}_2 \cdot \cosh(\bar{\gamma} \cdot l) + \overline{Z}_0 \cdot \overline{I}_2 \cdot \sinh(\bar{\gamma} \cdot l)}{\frac{\overline{U}_2}{\overline{Z}_0} \cdot \sinh(\bar{\gamma} \cdot l) + \overline{I}_2 \cdot \cosh(\bar{\gamma} \cdot l)} \quad (24)$$

Čitatele i jmenovatele podělíme  $\overline{I}_2$  a ve jmenovateli odstraníme zlomek:

$$\begin{aligned} \overline{Z}_1 = \frac{\overline{U}_1}{\overline{I}_1} &= \frac{\frac{\overline{U}_2}{\overline{I}_2} \cdot \cosh(\bar{\gamma} \cdot l) + \overline{Z}_0 \cdot \frac{\overline{I}_2}{\overline{I}_2} \cdot \sinh(\bar{\gamma} \cdot l)}{\frac{\overline{U}_2}{\overline{Z}_0} \cdot \frac{1}{\overline{I}_2} \cdot \sinh(\bar{\gamma} \cdot l) + \frac{\overline{Z}_0}{\overline{Z}_0} \cdot \frac{\overline{I}_2}{\overline{I}_2} \cdot \cosh(\bar{\gamma} \cdot l)} = \\ &= \overline{Z}_0 \cdot \frac{\overline{Z}_2 \cdot \cosh(\bar{\gamma} \cdot l) + \overline{Z}_0 \cdot \sinh(\bar{\gamma} \cdot l)}{\overline{Z}_2 \cdot \sinh(\bar{\gamma} \cdot l) + \overline{Z}_0 \cdot \cosh(\bar{\gamma} \cdot l)} \end{aligned} \quad (25)$$

Vidíme, že vstupní impedance závisí obecně na **zakoření**  $\overline{Z}_2$ , na **délce vedení**  $l$  a typu vedení  $\bar{\gamma}$ .

## 2.7. Útlumy používané v telekomunikační technice

Pokud jde o logaritmické jednotky přenosu, používá se v současné době ve výrobě i provozu přenosových zařízení důsledně jednotka decibel (označení dB).

### Obecné definice činitele přenosu, míry přenosu, útlumu a posuvu

Při nastavování přenosového řetězce sledujeme zpravidla výkonové poměry přenášeného signálu v přenosovém řetězci. Protože impedance částí přenosového řetězce nejsou obecně čistě reálné, ale mají reaktanční složku, vyjadřujeme zdánlivý výkon  $P$ :

$$P = \frac{U^2}{Z} = U \cdot I \quad [VA; V, A, \Omega] \quad (26)$$

kde  $U$  a  $I$  jsou efektivní hodnoty napětí a proudu,  $Z$  je absolutní hodnota impedance. Při zakončení přenosového řetězce nebo jeho částí reálnými impedancemi  $R$  přechází pak zdánlivý výkon na činný výkon  $P_s$

$$P_s = \frac{U^2}{R} \quad [W; V, \Omega] \quad (27)$$

Poměr mezi komplexním výkonem na vstupu  $P_1$  a výstupu  $P_2$ , vyjadřujeme činitelem přenosu výkonu  $g$ :

$$g = \sqrt{\frac{P_1}{P_2}} = \sqrt{\frac{U_1 I_1}{U_2 I_2}} \quad (28)$$

Činitel přenosu napětí

$$g_u = \frac{U_1}{U_2} \cdot e^{j(\varphi_{u1} - \varphi_{u2})} \quad (29)$$

Činitel přenosu proudu

$$g_i = \frac{I_1}{I_2} \cdot e^{j(\varphi_{i1} - \varphi_{i2})} \quad (30)$$

Ve vztazích (29) a (30) vyjadřují  $\varphi_u$  a  $\varphi_i$  fáze napětí a proudu v radiánech. Míra přenosu přenosového zařízení je komplexní veličina, vycházející z přirozených logaritmů. Míra přenosu napětí je:

$$G_u = \ln \frac{U_1}{U_2} + j(\varphi_{u1} - \varphi_{u2}) \quad (31)$$

$$G_u = A_u + jB_u \quad (32)$$

Reálnou část označujeme jako útlum napětí v neperech

$$A_u = \ln \frac{U_1}{U_2} \quad [Np] \quad (33)$$

nebo v decibelech

$$A_u = 20 \log \frac{U_1}{U_2} \quad [dB] \quad (34)$$

Imaginární část je posuv fázoru napětí mezi vstupem a výstupem:

$$B_u = (\varphi_{u1} - \varphi_{u2}) \quad [rad] \quad (35)$$

Míru přenosu výkonu  $G$  v souladu se vztahem (28) můžeme vyjádřit jako:

$$G = \ln g = \ln \sqrt{\frac{P_1}{P_2}} = A + jB \quad (36)$$

Reálná část výrazu (36) je útlum výkonu v neperech:

$$A = \ln \frac{U_1}{U_2} + \ln \frac{Z_1}{Z_2} \quad (37)$$

nebo v decibelech

$$A = 20 \log \frac{U_1}{U_2} + 10 \log \frac{Z_1}{Z_2} \quad (38)$$

$Z_1$  a  $Z_2$  jsou absolutní hodnoty vstupní impedance případně impedance připojené na výstup přenosového zařízení.

**Provozní útlum** charakterizuje přenos z hlediska útlumu u libovolně zakončených dvojbranů. Při stanovení provozního útlumu dodává generátor výkon  $P_1$  do impedance shodné s vnitřní impedancí generátoru ( $R_1 = R_i$ ,  $U_1 = U_i/2$ ). Zatěžovací impedance dvojbranu nemusí být shodná s vlnovou impedancí dvojbranu. Provozní útlum je dán vztahy:

$$A = 20 \log \frac{U_1}{U_2} + 10 \log \frac{Z_2}{Z_1} \quad [dB; V, \Omega] \quad (39)$$

$$A = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{Z_2}{Z_1} \quad [dB; dBu, \Omega] \quad (40)$$

**Vložný útlum** charakterizuje druh útlumu vzniklý vložení objektu mezi generátor a spotřebič, kdy  $R_1 = R_2$ . Je dán vztahy:

$$A_{IN} = 20 \log \frac{U_1}{U_2} + 10 \log \frac{R_2}{R_1} = 20 \log \frac{U_1}{U_2} \quad [dB; V, \Omega] \quad (41)$$

$$A_{IN} = L_1 - L_2 \quad [dB; dBu] \quad (42)$$

**Zbytkový útlum** je provozní útlum měřený na výstupu přenosového telefonního systému zakončeného normálovou reálnou impedancí  $R_2 = 600 \Omega$ . Na vstupu je připojený normálový generátor s výkonem  $P_{1n} = 1 \text{ mW}$ , vnitřním normálovým napětím  $U_{in} = 1,55 \text{ V}$  (svorkovým napětím  $U_{1n} = U_{in}/2 = 0,775 \text{ V}$ ) a vnitřním odporem  $R_{in} = 600 \Omega$ . Platí  $R_1 = R_2 = R_i = 600 \Omega$ . Odpor  $600 \Omega$  je mezinárodně dohodnutý standard pro vstupní a výstupní impedanci telekomunikačních zařízení. Zbytkový útlum v dB je dán vztahy:

$$A_Z = 10 \log \frac{P_{1n}}{P_2} \quad [dB; mW] \quad (43)$$

$$A_Z = 20 \log \frac{U_{1n}}{U_2} + 10 \log \frac{R_i}{R_i} = 20 \log \frac{U_{1n}}{U_2} \quad [dB; V, \Omega] \quad (44)$$

$$A_Z = -L_2 \quad [dB, dBu] \quad (45)$$

Nastavíme-li při měření normálové vnitřní napětí generátoru  $U_{in} = 1,55 \text{ V}$ , tj. svorkové napětí  $U_{1n} = U_{in}/2 = 0,775 \text{ V}$ , bude  $L_1 = 0$ . Vyplývá to z definice absolutní úrovně napětí:

$$L_1 = 20 \log \frac{U_x}{0,775} \quad (46)$$

Teorie útlumů dle [7].

## 3 Matematický model a jeho programová realizace

Sestavíme model, který by nám na základě sekundárních, respektive primárních parametrů zobrazoval hodnoty útlumů vedení. Níže máme uvedeny výpočty vlnové impedance a měrné míry přenosu, pro dva typy použitých kabelů. Všechny technické údaje o kabelech jsou uvedeny [2].

### 3.1. Vlnová impedance

Vlnová impedance je pro kabel SYKFY 2x2x0,5 mm vypočtena ze vztahu (13), kde je zanedbána indukčnost a svod. Za primární parametry jsou dosazeny naměřené hodnoty odporu  $R = 91,07 \Omega/\text{km}$  a kapacity  $C = 135,2 \text{ nF/km}$ .

Komplexní tvar vlnové impedance při frekvenci 1 kHz pak je:

$$\begin{aligned}\bar{Z}_0 &= \sqrt{\frac{(R + j \cdot \omega \cdot L)}{(G + j \cdot \omega \cdot C)}} = \sqrt{\frac{R \cdot e^{j0^\circ}}{\omega \cdot C \cdot e^{j90^\circ}}} = \sqrt{\frac{91,07 \cdot e^{j0^\circ}}{2 \cdot \pi \cdot 1000 \cdot 135,2 \cdot 10^{-9} \cdot e^{j90^\circ}}} = \\ &= \sqrt{\frac{91,07 \cdot e^{j0^\circ}}{0,849 \cdot 10^{-3} \cdot e^{j90^\circ}}} = \frac{9,543}{29,15 \cdot 10^{-3}} \cdot e^{j-45^\circ} = \\ &= 327 \Omega \cdot e^{j-45^\circ}\end{aligned}\quad (47)$$

$$\begin{aligned}\bar{Z}_0 &= Z_0 \cdot (\cos(-45^\circ) + \sin(-45^\circ)j) = 327,38 \cdot (\cos(-45^\circ) + j\sin(-45^\circ)) \\ &= 232 - 232j \Omega\end{aligned}\quad (48)$$

Absolutní hodnota vlnové impedance (14), při frekvenci 1 kHz pak je:

$$Z_0 = \sqrt[4]{\frac{R^2}{\omega^2 C^2}} = \sqrt[4]{\frac{91,07^2}{(2\pi \cdot 1000)^2 \cdot (135,2 \cdot 10^{-9})^2}} = 327 \Omega \quad (49)$$

Frekvenční závislost absolutní hodnoty vlnové impedance je uvedena na obr. 4, resp. v tabulce 1. V obr. 4 máme uvedenu rovnici křivky  $327,42x^{-0,5}$ , kterou poté zadáváme do programu a je nezbytná pro hladký průběh modelu.



**Vlnová impedance kabelu TCEPKPFLE 15x4x0,4 mm** je vypočtena z naměřených hodnot vstupní impedance naprázdno  $Z_{10}$  a nakrátko  $Z_{1K}$ . Určení vstupní impedance naprázdno a nakrátko je uvedeno v příloze A, tabulka 5. Při frekvenci  $f = 1$  kHz jsou hodnoty vstupní impedance  $Z_{10} = 2573 \Omega$  a  $Z_{1K} = 234 \Omega$ .

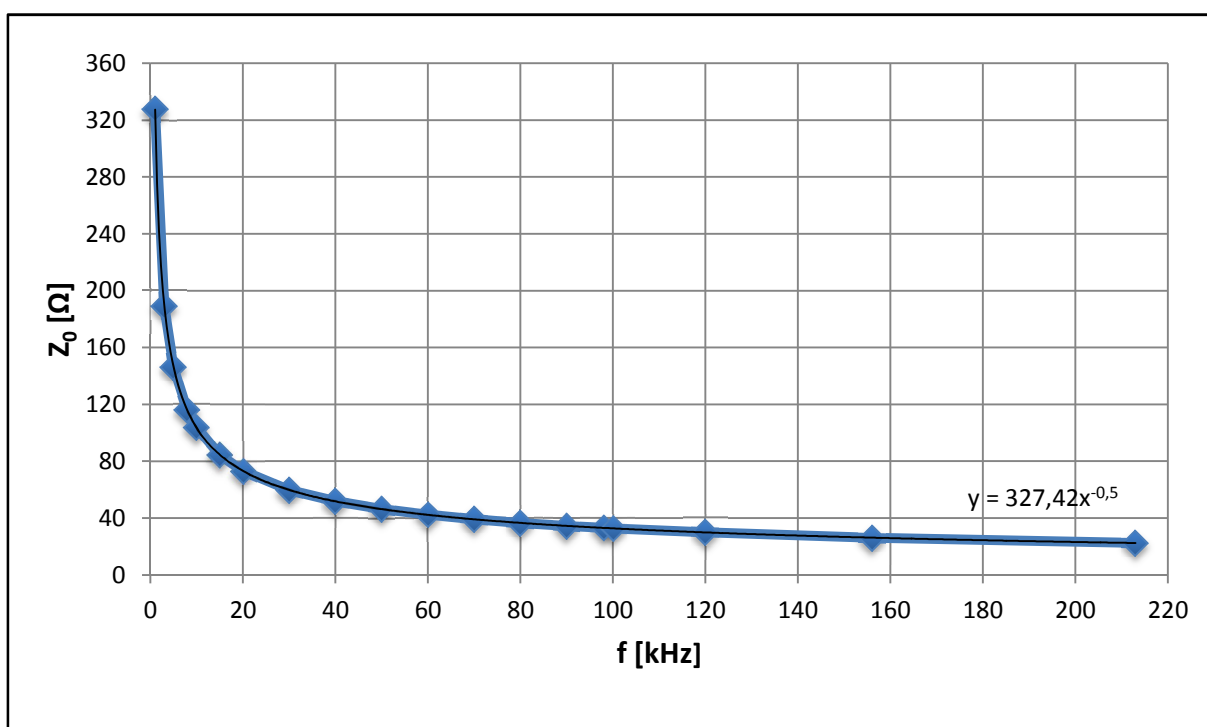
Absolutní hodnota vlnové impedance je:

$$Z_0 = \sqrt{Z_{10} \cdot Z_{1K}} = \sqrt{2573 \cdot 234} = 776 \Omega \quad (50)$$

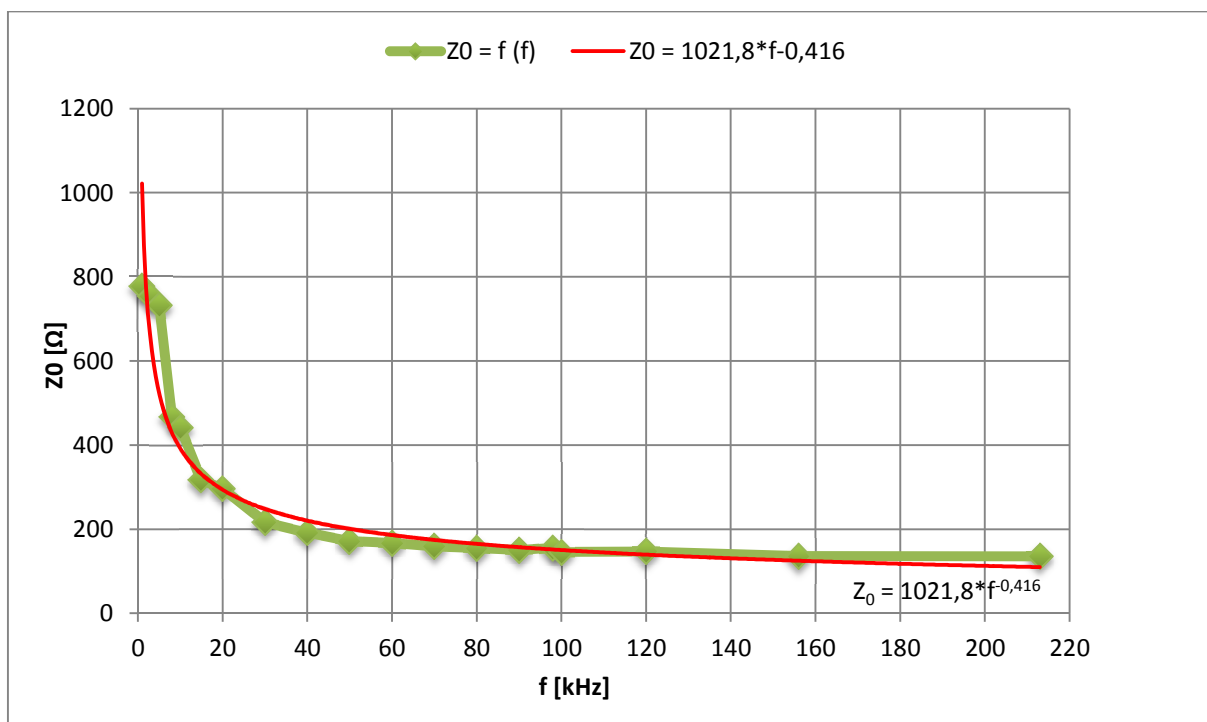
V komplexním tvaru:

$$\begin{aligned} \overline{Z_0} &= Z_0 \cdot (\cos(-45) + \sin(-45)j) = 776 \cdot (\cos(-45) + j\sin(-45)) \\ &= 549 - 549j \Omega \end{aligned} \quad (51)$$

Frekvenční závislost absolutní hodnoty vlnové impedance je uvedena na obr. 5, resp. v tabulce 1. Pro následující výpočty byl průběh nahrazen regresní křivkou s rovnicí  $Z_0 = 1021,8 * f^{-0,416}$ . Rovnici regresní křivky zadáváme do programu, je nezbytná pro hladký průběh modelu.



Obr. 4: Frekvenční závislost absolutní hodnoty vlnové impedance kabelu SYKFY 2x2x0,5 mm



Obr. 5: Frekvenční závislost absolutní hodnoty vlnové impedance kabelu TCEPKPFLE 15x4x0,4 mm

	Vlnová impedance $Z_0$					
	Kabel SYKFY 2x2x0,5 mm			TCEPKPFLE 15x4x0,4 mm		
f	$\overline{Z_0}$	$Z_0$	$\varphi_{Z_0}$	$\overline{Z_0}$	$Z_0$	$\varphi_{Z_0}$
[kHz]	[ $\Omega$ ]	[ $\Omega$ ]	[°]	[ $\Omega$ ]	[ $\Omega$ ]	[°]
1	232-232j	327	-45	723-723j	1022	-45
3	134-134j	189	-45	458-458j	647	-45
5	104-104j	146	-45	370-370j	523	-45
8	82-82j	116	-45	304-304j	430	-45
10	73-73j	104	-45	277-277j	392	-45
15	60-60j	85	-45	234-234j	331	-45
20	52-52j	73	-45	208-208j	294	-45
30	42-42j	60	-45	176-176ji	248	-45
40	37-37j	52	-45	156-156j	220	-45
50	33-33j	46	-45	142-142j	201	-45
60	30-30j	42	-45	132-132j	186	-45
70	28-28j	39	-45	123-123j	175	-45
80	26-26j	37	-45	117-117j	165	-45
90	24-24j	35	-45	111-111j	157	-45
98	23-23j	33	-45	107-107j	152	-45
100	23-23j	33	-45	106-106j	150	-45
120	21-21j	30	-45	99-99j	139	-45
156	19-19j	26	-45	88-88j	125	-45
213	16-16j	22	-45	78-78j	110	-45

Tabulka 1: Frekvenční závislost vlnové impedance kabelů SYKFY 2x2x0,5 mm a TCEPKPFLE 15x4x0,4 mm

### 3.2. Měrná míra přenosu

Měrnou míru přenosu  $\gamma$  vypočítáme u obou typů kabelů z primárních parametrů.

**Měrná míra přenosu je pro kabel SYKFY 2x2x0,5 mm** vypočtena ze vztahu (17), kde je zanedbána indukčnost  $L$  a svod  $G$ . Za primární parametry jsou dosazeny naměřené hodnoty odporu  $R = 91,07 \Omega/\text{km}$  a kapacity  $C = 135,2 \text{ nF}/\text{km}$ .

Komplexní tvar měrné míry přenosu při frekvenci 1 kHz pak je:

$$\begin{aligned}\gamma &= \sqrt{(R + j \cdot \omega \cdot C) \cdot (G + j \cdot \omega \cdot C)} = \sqrt{R \cdot e^{j0^\circ} \cdot \omega \cdot C \cdot e^{j90^\circ}} = \sqrt{\omega \cdot R \cdot C} \cdot e^{j45^\circ} = \\ &= \sqrt{2\pi \cdot 1000 \cdot 91,07 \cdot 135,2 \cdot 10^{-9}} \cdot e^{j45^\circ} = 0,278 \cdot e^{j45^\circ}\end{aligned}\quad (52)$$

$$\begin{aligned}\bar{\gamma} &= \sqrt{\frac{\omega \cdot R \cdot C}{2}} + j \sqrt{\frac{\omega \cdot R \cdot C}{2}} = \sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot 1000 \cdot 91,07 \cdot 135,2 \cdot 10^{-9}}{2}} + j \sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot 1000 \cdot 91,07 \cdot 135,2 \cdot 10^{-9}}{2}} = \\ &= 0,197 + 0,197j\end{aligned}\quad (53)$$

Absolutní hodnota měrné míry přenosu při frekvenci 1 kHz pak je

$$\begin{aligned}\gamma &= \sqrt[4]{R^2} \cdot \sqrt[4]{\omega^2 \cdot C^2} = \sqrt[4]{91,07^2} \cdot \sqrt[4]{(2\pi \cdot 1000)^2 \cdot (135,2 \cdot 10^{-9})^2} = \\ &= 0,278 \text{ km}^{-1}\end{aligned}\quad (54)$$

Frekvenční závislost absolutní hodnoty měrné míry přenosu je uvedena na obr. 6, resp. v tabulce 2.

**Měrná míra přenosu je pro kabel TCEPKPFLE 15x4x0,4 mm** vypočtena ze vztahu (17), kde je zanedbána indukčnost  $L$  a svod  $G$ . Za primární parametry jsou dosazeny naměřené hodnoty odporu  $R = 142,05 \Omega/\text{km}$  a kapacity  $C = 46 \text{ nF}/\text{km}$ .

Komplexní tvar měrné míry přenosu při frekvenci 1 kHz pak je:

$$\gamma = \sqrt{(R + j \cdot \omega \cdot C) \cdot (G + j \cdot \omega \cdot C)} = \sqrt{R \cdot e^{j0^\circ} \cdot \omega \cdot C \cdot e^{j90^\circ}} = \sqrt{\omega \cdot R \cdot C} \cdot e^{j45^\circ} =$$

$$\sqrt{2\pi \cdot 1000 \cdot 142,05 \cdot 46 \cdot 10^{-9}} \cdot e^{j45^\circ} = 0,203 \cdot e^{j45^\circ} \quad (55)$$

$$\bar{\gamma} = \sqrt{\frac{\omega \cdot R \cdot C}{2}} + j \sqrt{\frac{\omega \cdot R \cdot C}{2}} = \sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot 1000 \cdot 142,05 \cdot 46 \cdot 10^{-9}}{2}} + j \sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot 1000 \cdot 142,05 \cdot 46 \cdot 10^{-9}}{2}} =$$

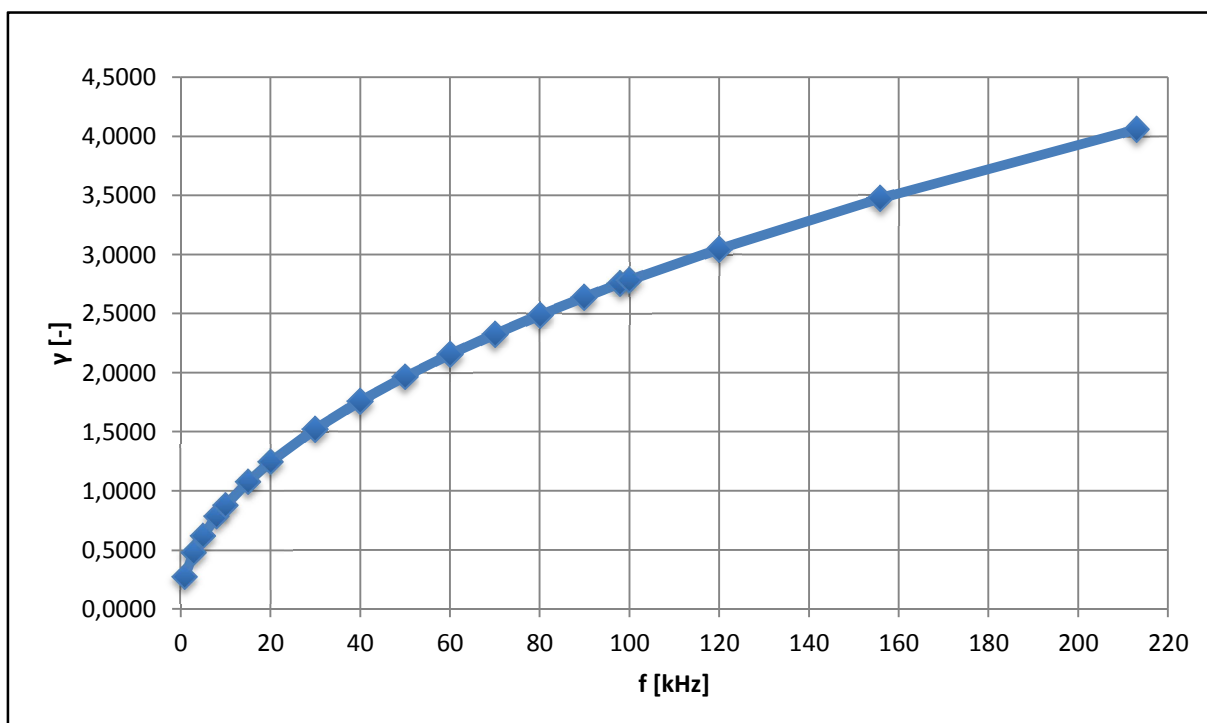
$$= 0,143 + 0,143j \quad (56)$$

Absolutní hodnota měrné míry přenosu při frekvenci 1 kHz pak je:

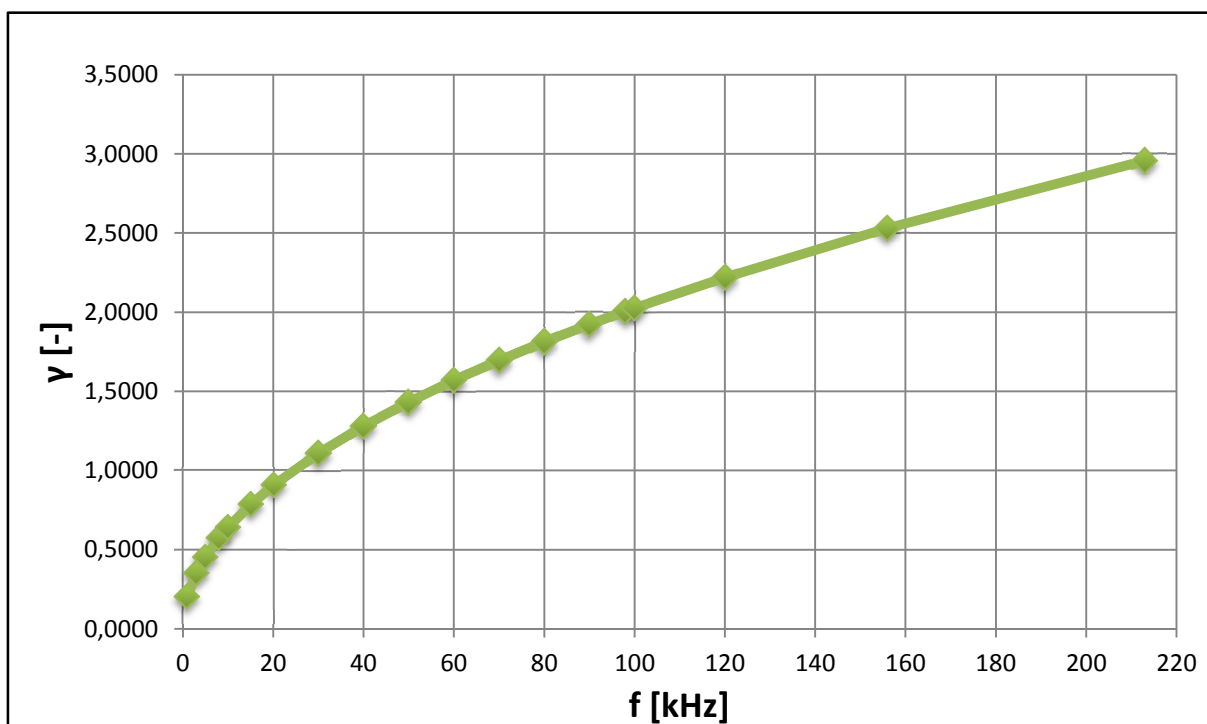
$$\gamma = \sqrt[4]{R^2} \cdot \sqrt[4]{\omega^2 \cdot C^2} = \sqrt[4]{142,05^2} \cdot \sqrt[4]{(2\pi \cdot 1000)^2 \cdot (46 \cdot 10^{-9})^2} =$$

$$= 0,203 \text{ km}^{-1} \quad (57)$$

Frekvenční závislost absolutní hodnoty měrné míry přenosu je uvedena na obr. 7, resp. v tabulce 2.



Obr. 6: Frekvenční závislost absolutní hodnoty měrné míry přenosu kabelu SYKFY 2x2x0,4 mm



Obr. 7: Frekvenční závislost absolutní hodnoty měrné míry přenosu kabelu TCEPKPFLE 15x4x0,4 mm

	Měrná míra přenosu $\gamma$					
	Kabel SYKFY 2x2x0,5 mm			TCEPKPFLE 15x4x0,4 mm		
f	$\bar{\gamma}$	$\gamma$	$\varphi_\gamma$	$\bar{\gamma}$	$\gamma$	$\varphi_\gamma$
[kHz]	[-]	[-]	[°]	[-]	[-]	[°]
1	0,197+0,197j	0,278	45	0,143+0,143j	0,203	45
3	0,341+0,341j	0,482	45	0,248+0,248j	0,351	45
5	0,440+0,440j	0,622	45	0,320+0,320j	0,451	45
8	0,556+0,556j	0,787	45	0,405+0,405j	0,573	45
10	0,622+0,622j	0,880	45	0,453+0,453j	0,641	45
15	0,762+0,762j	1,077	45	0,555+0,555j	0,785	45
20	0,880+0,88j	1,244	45	0,641+0,641j	0,906	45
30	1,077+1,077j	1,523	45	0,785+0,785j	1,110	45
40	1,244+1,244j	1,751	45	0,906+0,906j	1,282	45
50	1,391+1,391j	1,967	45	1,013+1,013j	1,433	45
60	1,523+1,523j	2,155	45	1,110+1,110j	1,570	45
70	1,646+1,646j	2,327	45	1,199+1,199j	1,695	45
80	1,759+1,759j	2,488	45	1,282+1,282j	1,8123	45
90	1,866+1,866j	2,639	45	1,359+1,359j	1,922	45
98	1,947+1,947j	2,754	45	1,418+1,418j	2,006	45
100	1,967+1,967j	2,781	45	1,433+1,433j	2,026	45
120	2,155+2,155j	3,047	45	1,570+1,570j	2,220	45
156	2,457+2,457j	3,474	45	1,790+1,790j	2,530	45
213	2,870+2,870j	4,059	45	2,091+2,091j	2,957	45

Tabulka 2: Měrná míra přenosu  $\gamma$ , kabelů SYKFY 2x2x0,4 mm a TCEPKPFLE 15x4x0,4 mm

### 3.3. Výpočet vstupní impedance

Vstupní impedance je závislá na sekundárních parametrech a také na délce vedení a velikosti zátěže. Vzhledem k možnostem ověření matematického modelu měřením, je vstupní impedance vypočtena z odvozeného vztahu (25). Vypočtené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 3 (sloupce  $Z_1$ ), pro kabel SYKFY 2x2x0,4 mm a pro různé délky kabelu TCEPKPFLE 15x4x0,4 mm v příloze A, tabulky 3, 4, 5, 6, 7 (sloupce  $Z_1$ ).

Příklad výpočtu vstupní impedance pro kabel TCEPKPFLE 15x4x0,4 mm,  $f = 1$  kHz; délka  $l = 1048,1$  m, zátěž  $Z_2 = 150 \Omega$ ,  $\bar{\gamma} \cdot l = 0,1502 + 0,1502j$ ,  $Z_0 = 722,522 - 722,522j$ :

$$Z_1 = Z_0 \cdot \frac{Z_2 \cdot \cosh(\bar{\gamma} \cdot l) + Z_0 \cdot \sinh(\bar{\gamma} \cdot l)}{Z_2 \cdot \sinh(\bar{\gamma} \cdot l) + Z_0 \cdot \cosh(\bar{\gamma} \cdot l)}$$

$$\bar{Z}_1 = (722,522 - 722,522j) \cdot \frac{150 \cdot \cosh(0,1502 + 0,1502j) + 722,522 - 722,522j \cdot \sinh(0,1502 + 0,1502j)}{150 \cdot \sinh(0,1502 + 0,1502j) + 722,522 - 722,522j \cdot \cosh(0,1502 + 0,1502j)}$$

$$\bar{Z}_1 = 366,3 - 14,71j \Omega$$

(58)

$$|Z_1| = 367 \Omega$$



### 3.4. Vytvoření algoritmu matematického modelu

V následující kapitole rozebereme postup vytvoření algoritmu modelu, pro výpočet útlumu na měřených kabelech.

Vycházíme z kaskádových rovnic vedení, vztahy (6) a (7):

Po dosazení za  $\bar{I}_2$  ( $\bar{I}_2 = \frac{U_2}{\bar{Z}_2}$ ) dostaneme:

$$\bar{U}_1 = \bar{U}_2 \cosh(\bar{\gamma} \cdot l) + \bar{Z}_0 \frac{\bar{U}_2}{\bar{Z}_2} \sinh(\bar{\gamma} \cdot l) \quad (59)$$

$$\frac{\bar{U}_1}{\bar{U}_2} = \cosh(\bar{\gamma} \cdot l) + \frac{\bar{Z}_0}{\bar{Z}_2} \cdot \sinh(\bar{\gamma} \cdot l) \quad (60)$$

Následně dosadíme do níže uvedené rovnice pro výpočet útlumu:

$$A = 20 \log \frac{U_1}{U_2} + 10 \log \frac{Z_2}{Z_1} \quad (61)$$

Za  $\frac{\bar{U}_1}{\bar{U}_2}$  rovnicí (61) a za  $Z_1$  rovnicí vstupní impedance (25).

$$A = 20 \log \left[ \cosh(\bar{\gamma} \cdot l) + \frac{\bar{Z}_0}{\bar{Z}_2} \cdot \sinh(\bar{\gamma} \cdot l) \right] +$$

$$+ 10 \log \left[ \frac{Z_2}{\bar{Z}_0 \cdot \frac{Z_2 \cdot \cosh(\bar{\gamma} \cdot l) + \bar{Z}_0 \cdot \sinh(\bar{\gamma} \cdot l)}{\bar{Z}_2 \cdot \sinh(\bar{\gamma} \cdot l) + \bar{Z}_0 \cdot \cosh(\bar{\gamma} \cdot l)}} \right] \quad (62)$$

Po úpravě složeného zlomku dostáváme výsledný vztah pro vypočtené hodnoty útlumu.

$$A = 20 \log \left[ \cosh(\bar{\gamma} \cdot l) + \frac{\bar{Z}_0}{Z_2} \cdot \sinh(\bar{\gamma} \cdot l) \right] +$$

$$+ 10 \log \left[ \frac{Z_2^2 \cdot \sinh(\bar{\gamma} \cdot l) + \bar{Z}_0 \cdot Z_2 \cdot \cosh(\bar{\gamma} \cdot l)}{\bar{Z}_0 \cdot Z_2 \cdot \cosh(\bar{\gamma} \cdot l) + \bar{Z}_0^2 \cdot \sinh(\bar{\gamma} \cdot l)} \right] \quad (63)$$

Hodnoty provozního a zbytkového útlumu vypočtené použitím matematického modelu (63), jsou pro kabel SYKFY 2x2x0,5 mm uvedeny v tabulce 3 a pro kabel TCEPKPFLE 15x4x0,4 mm v příloze A, tabulky 3, 4, 5, 6, 7.

f	$\bar{\gamma} \cdot l$	$\bar{\gamma} \cdot l$ komplexní číslo	Provozní útlum		Zbytkový útlum	
			$Z_1$	A model	$Z_1$	A model
			[Ω]	[dB]	[Ω]	[dB]
1	0,196	0,196+0,196j	173	0,62	618	0,2
3	0,340	0,340+0,340j	172	0,64	581	0,47
5	0,439	0,439+0,439j	170	0,67	523	0,92
8	0,555	0,555+0,555j	167	0,76	433	1,74
10	0,621	0,621+0,621j	164	0,85	381	2,29
15	0,760	0,760+0,760ji	154	1,1	286	3,55
20	0,878	0,878+0,878j	144	1,42	225	4,59
30	1,075	1,075+1,075j	122	2,14	156	6,19
40	1,241	1,241+1,241j	104	2,86	119	7,39
50	1,387	1,387+1,387j	89	3,53	96	8,34
60	1,520	1,520+1,520j	77	4,15	80	9,12
70	1,642	1,642+1,642j	68	4,71	69	9,79
80	1,755	1,755+1,755j	61	5,22	61	10,38
90	1,861	1,861+1,861j	55	5,69	54	10,9
98	1,942	1,942+1,942j	51	6,04	50	11,28
100	1,962	1,962+1,962j	50	6,12	49	11,37
120	2,149	2,149+2,149j	43	6,89	41	12,2
156	2,451	2,451+2,451j	34	8,04	32	13,41
213	2,864	2,864+2,864j	25	9,5	24	14,92

Tabulka 3: Vypočtené hodnoty provozního a zbytkového (matematický model), kabel SYKFY 2x2x0,5 mm, l = 250 m

## 3.5. Programová realizace

### 3.5.1. Prostředky k realizaci programu

Pro vytvoření programu bylo zvoleno vývojové prostředí Microsoft Visual Studio 2010. Program byl vyvíjen v programovacím jazyku C#, pro tvorbu a zobrazení grafů jsem využil knihovnu ZedGraph.



Obr. 8: Microsoft Visual Studio 2010

### 3.5.2. Programovací jazyk C#

Jazyk C# je objektově orientovaný programovací jazyk, který vytvořila počítačová firma Microsoft zároveň s platformou NET. První zmínky se dostaly na veřejnost v roce 2000, jako součást Visual Studia .NET. Je to vlastně zjednodušená, vylepšená a čistě objektová verze programovacího jazyka C++.

C# se využívá hlavně k tvorbě **databázových programů, webových aplikací, webových služeb, formulářových aplikací** ve Windows a podobně. Nyní existuje pět verzí .NET Frameworku. Verze 1.1, 2.0, 3.0, 3.5 a nejnovější 4.0.

- **Verze 1.0:** přichází první verze objektově orientovaného programovacího jazyka C# s Frameworkem 1.0. Vznikají jednoduché programy a skoro žádné výhody pro jednoduchost kódu.

- **Verze 2.0:** s touto verzí přichází i nové doplňky jazyka jako jsou částečné a statické třídy, generika, iterátory a anonymní metody pro pohodlnější užívání delegátů (odkazů na metody).

- **Verze 3.0:** tato verze vyšla společně s verzí 3.5. Tato verze byla dosti značně vylepšena. Jazyk C# byl v tuto dobu dosti obohacen skvělými doplňky. Můžeme zde najít novinky jako je dotazovací jazyk (LINQ) nebo nové lambda výrazy.

- **Verze 4.0:** nejnovější verze, která je stále ve vývoji. S touto verzí se můžeme těšit na dynamicky typované objekty či třeba na kovarianci a kontravarianci.

Dále tu je prostředí **.NET Framework**. Toto prostředí je nezbytnou podmínkou pro programování v jazyce C# a skládá se z několika částí. Tou první je společné běhové prostředí **Common Language Runtime (CLR)**. Ten zajišťuje běh programů přeložených z různých programovacích jazyků do **mezi jazyka Microsoft Intermediate Language (MSIL)**. CLR umožňuje jejich vzájemnou spolupráci, takže různé součásti programu mohou být napsány v různých programovacích jazycích. Dále tu je knihovna tříd nazývaná **Basic Class Library (BCL)**. Třídy slouží pro ukládání různých druhů dat. Nad touto knihovnou jsou ještě knihovny pro tvorbu grafického uživatelského rozhraní programů a knihovny pro webové služby. Nejvyšší vrstvu tvoří překladače různých programovacích jazyků. Informace o C# byly čerpány z [1].

### 3.5.3. ZedGraph

Jedná se o knihovnu pro .NET, která nabízí velice jednoduché a účelné řešení pro vytváření velkého množství grafů. ZedGraph spadá pod LGPL licenci, můžeme jej tedy volně používat v aplikacích, pokud neměníte kód této komponenty dle [8].

### 3.5.4. Výstupy programu

Ukázky výpočtu pomocí programu, kabel TCEPKPFLE 15x4x0,4 mm, délka 1572,5 m. Více o programu viz přílohy na CD – „programatorska\_prirucka.pdf“ a „uzivatelska\_prirucka.pdf“.

Pro zpracování naměřených hodnot provozního a zbytkového útlumu zadáváme do programu frekvenci a napěťovou úroveň  $L_2$ .

	f [kHz]	L2 [dBu]	A [dB]
1.	1	-12,6	6,58
2.	3	-10,4	4,38
3.	5	-12,8	6,78
4.	8	-13,5	7,48
5.	10	-13,5	7,48
6.	15	-16	9,98
7.	20	-18	11,98
8.	30	-19,8	13,78
9.	40	-20,4	14,38
10.	50	-22	15,98
11.	60	-22	15,98
12.	70	-21,6	15,58
13.	80	-21,6	15,58
14.	90	-21,8	15,78
15.	98	-22,2	16,18
16.	100	-22,4	16,38

Obr. 9: Zpracování naměřených hodnot pro výpočet provozního útlumu pomocí programu

**Zpracování naměřených hodnot**

Vyber útlum

Počet zadávaných hodnot: 19

	f [kHz]	L2 [dBu]	A [dB]
1.	1	-3	3
2.	3	-3	3
3.	5	-4,5	4,5
4.	8	-6,5	6,5
5.	10	-8	8
6.	15	-10,4	10,4
7.	20	-12,6	12,6
8.	30	-15	15
9.	40	-17	17
10.	50	-17,6	17,6
11.	60	-17,7	17,7
12.	70	-17,6	17,6
13.	80	-17,6	17,6
14.	90	-17,6	17,6
15.	98	-18	18
16.	100	-18,6	18,6

Obr. 10: Zpracování naměřených hodnot pro výpočet zbytkového útlumu pomocí programu

Pro výpočet matematického modelu zadáváme do programu hodnotu zátěže  $Z_2$  v  $[\Omega]$ , délku  $l$  v [km], odpor  $R$  v  $[\Omega \cdot \text{km}^{-1}]$ , kapacitu  $C$  v  $[\text{nF} \cdot \text{km}^{-1}]$  a rovnici regresní křivky frekvenční závislosti vlnové impedance  $Z_0$ .

**Matematický model**

**Výpočet pomocí matematického modelu**

**Zadávané hodnoty**

$Z_2$  150  $[\Omega]$

$l$  1,5725 v km (např. 1,52)

$R$  142  $[\Omega/\text{km}]$

$C$  46  $[\text{nF}/\text{km}]$

Rovnice regresní křivky  $Z_0$ :  
 1021,800 \* f<sup>-0,416</sup>

Počet zadávaných hodnot: 19

**Vypočtené hodnoty**

	f [kHz]	Y (komplexní tvar)	Z1 vstupní impedance $[\Omega]$	Z0 (ej-45°Q) z regresní křivky $[\Omega]$	A [dB]
1.	1	0,1013 -i0,1013	474	1022	5,03
2.	3	0,1754 -i0,1754	494	647	5,42
3.	5	0,2265 -i0,2265	489	523	5,75
4.	8	0,2865 -i0,2865	462	430	6,29
5.	10	0,3203 -i0,3203	440	392	6,67
6.	15	0,3923 -i0,3923	383	331	7,65
7.	20	0,453 -i0,453	335	294	8,61
8.	30	0,5548 -i0,5548	269	248	10,34
9.	40	0,6406 -i0,6406	229	220	11,87
10.	50	0,7163 -i0,7163	203	201	13,26
11.	60	0,7846 -i0,7846	186	186	14,53
12.	70	0,8475 -i0,8475	173	175	15,71
13.	80	0,906 -i0,906	163	165	16,82
14.	90	0,961 -i0,961	156	157	17,88
15.	98	1,0028 -i1,0028	150	152	18,68
16.	100	1,0129 -i1,0129	149	150	18,88
17.	120	1,1096 -i1,1096	139	139	20,75
18.	156	1,2652 -i1,2652	125	125	23,79

Obr. 11: Výpočet provozního útlumu z matematického modelu

Matematický model

### Výpočet pomocí matematického modelu

**Zadávané hodnoty**

ZZ 600 [Ω]

I 1,5725 v km (např. 1,52)

R 142 [Ω/km]

C 46 [nF/km]

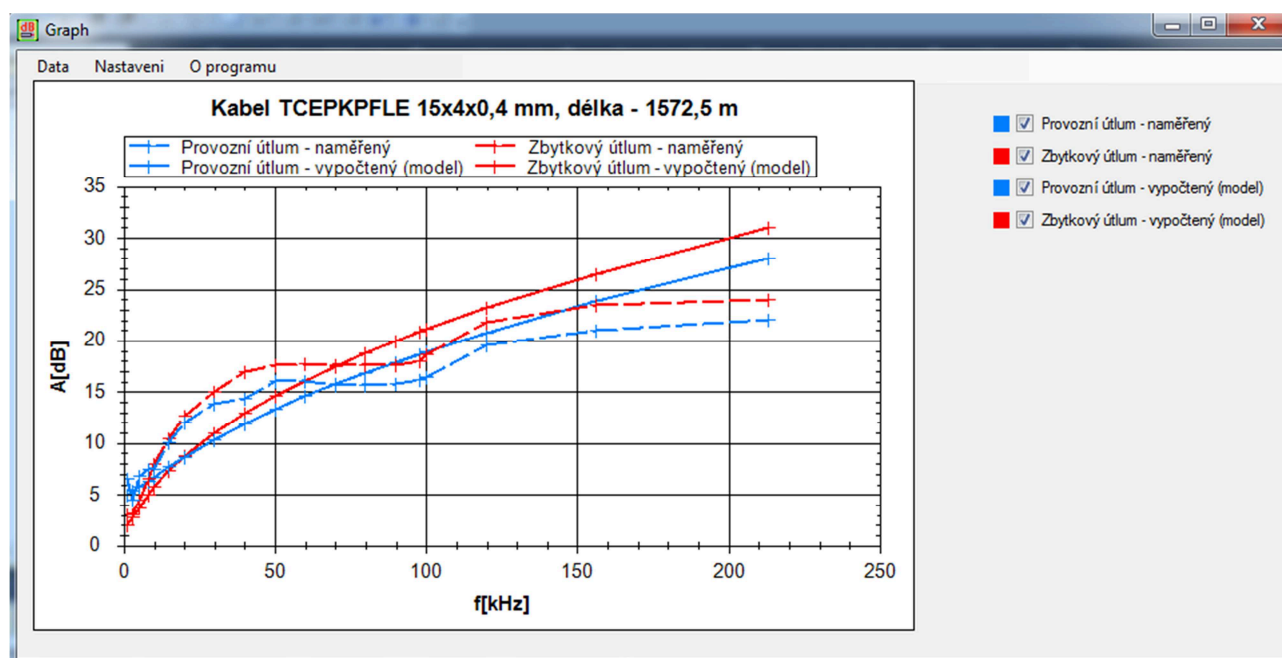
Rovnice regresní křivky Z0:  
1021,800 \* f<sup>-0,416</sup>

Počet zadáných hodnot: 19

**Vypočtené hodnoty**

f [kHz]	Y (komplexní tvar)	Z1 vstupní impedance [Ω]	Z0 (ej-45°Q) z regresní křivky [Ω]	A [dB]
1.	0,1013 - i0,1013	904	1022	1,99
2.	0,1754 - i0,1754	817	647	2,75
3.	0,2265 - i0,2265	697	523	3,64
4.	0,2865 - i0,2865	551	430	4,92
5.	0,3203 - i0,3203	481	392	5,69
6.	0,3923 - i0,3923	369	331	7,34
7.	0,453 - i0,453	306	294	8,71
8.	0,5548 - i0,5548	242	248	10,98
9.	0,6406 - i0,6406	210	220	12,89
10.	0,7163 - i0,7163	191	201	14,57
11.	0,7846 - i0,7846	179	186	16,08
12.	0,8475 - i0,8475	169	175	17,46
13.	0,906 - i0,906	162	165	18,74
14.	0,961 - i0,961	155	157	19,94
15.	1,0028 - i1,0028	150	152	20,85
16.	1,0129 - i1,0129	149	150	21,07
17.	1,1096 - i1,1096	139	139	23,16
18.	1,2652 - i1,2652	125	125	26,49

Obr. 12: Výpočet zbytkového útlumu z matematického modelu



Obr. 13: Srovnání naměřených a vypočtených hodnot modelu

## 4 Experimentální ověření matematického modelu

### 4.1. Měření útlumů

Pro měření zbytkového a provozního útlumu na kabelech SYKFY 2x2x0,5 mm a TCEPKPFLE 15x4x0,4 mm, byly použity: generátor signálu - Metex MS-9170, měřič úrovně - Instek GVT-427B a odporové zátěže 150 a 600  $\Omega$ . Všechny naměřené hodnoty provozního a zbytkového útlumu jednotlivých délek jsou uvedeny v tabulce 4 a v příloze A, tabulka 2.

#### 4.1.1. Měření frekvenční charakteristiky provozního útlumu

Obvod byl zapojen dle obr. 14 a), připojen odpor  $R_1$  o velikosti 600  $\Omega$  a nastaven vnitřní odpor generátoru  $R_i$  na 600  $\Omega$ . Na generátoru nastavena frekvence  $f = 1$  kHz a amplituda AMP tak, aby na měřiči úrovně byla úroveň  $L_1 = 0$  dBm. Takto nastavená úroveň se ponechala pro měření provozního útlumu.

Po nastavení úrovně 0 dBm byl obvod zapojen dle obr. 14 b), kde hodnota odporu  $R_2 = 150$   $\Omega$  a vnitřní odpor generátoru ponechán na hodnotě 600  $\Omega$ . Dále byly na generátoru nastavovány frekvence dle tabulky (1 – 213 kHz) a postupně k nim zapisovány hodnoty úrovně  $L_2$  a napětí  $U_2$ .

#### Výpočet provozního útlumu

Příklad výpočtu provozního útlumu dle vztahu (40).

Kabel TCEPKPFLE 15x4x0,4 mm  $f = 1$  kHz,  $L_1 = 0$ ,  $L_2 = -11,2$ ,  $Z_1 = 600$   $\Omega$ ,  $Z_2 = 150$   $\Omega$ , délka vedení 1048,1 m:

$$\begin{aligned} A &= L_1 - L_2 + 10 \cdot \log \frac{Z_2}{Z_1} = 0 - (-11,2) + 10 \cdot \log \frac{150}{600} \\ &= 11,2 - 6,02 = 5,18 \text{ dB} \end{aligned} \quad (64)$$

### 4.1.2. Měření frekvenční charakteristiky zbytkového útlumu

Obvod byl zapojen dle obr. 14 a), připojen odpor  $R_1$  o velikosti  $600 \Omega$  a nastaven vnitřní odpor generátoru  $R_i$  na  $600 \Omega$ . Na generátoru nastavena frekvence  $f = 1 \text{ kHz}$  a amplituda AMP tak, aby na měřiči úrovně byla úroveň  $L_1 = 0 \text{ dBm}$ . Takto nastavená úroveň se ponechala pro měření provozního útlumu.

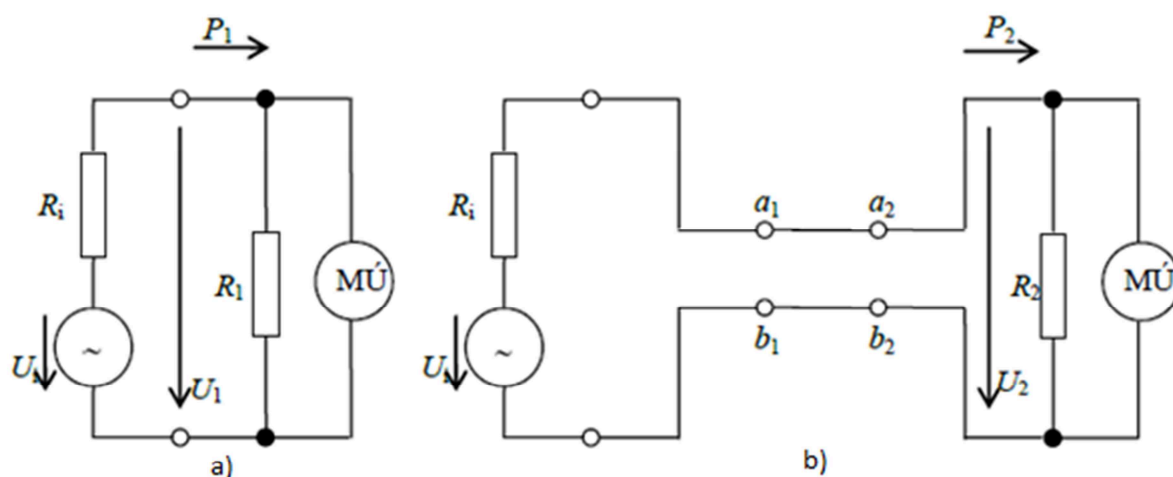
Po nastavení úrovně  $0 \text{ dBm}$  byl obvod zapojen dle obr. 14 b), kde hodnota odporu  $R_2 = 600 \Omega$  a vnitřní odpor generátoru ponechán na hodnotě  $600 \Omega$ . Dále byly na generátoru nastavovány frekvence dle tabulky ( $1 - 213 \text{ kHz}$ ) a postupně k nim zapisovány hodnoty úrovně  $L_2$  a napětí  $U_2$ .

### Výpočet zbytkového útlumu

Příklad výpočtu zbytkového útlumu dle vztahu (45).

Kabel TCEPKPFLE  $15 \times 4 \times 0,4 \text{ mm}$ ,  $f = 1 \text{ kHz}$ ,  $L_1 = 0$ ,  $L_2 = -2$ ,  $l = 1048,1 \text{ m}$ :

$$A_Z = -L_2 = -(-2) = 2 \text{ dB} \quad (65)$$



Obr. 14: Schéma pro měření provozního a zbytkového útlumu



SYKFY 2x2x0,5 mm, l = 250 m						
	Provozní útlum			Zbytkový útlum		
f	U <sub>2</sub>	L <sub>2</sub>	A	U <sub>2</sub>	L <sub>2</sub>	A
[kHz]	[V]	[dBm]	[dB]	[V]	[dBm]	[dB]
1	0,29	-9	2,98	0,74	-0,4	0,4
3	0,29	-9	2,98	0,72	-0,6	0,6
5	0,29	-9	2,98	0,7	-1	1
8	0,29	-9	2,98	0,64	-1,6	1,6
10	0,28	-9,5	3,48	0,62	-2	2
15	0,26	-10	3,98	0,53	-3,5	3,5
20	0,26	-10	3,98	0,46	-4,5	4,5
30	0,23	-10,6	4,58	0,36	-7	7
40	0,2	-11,6	5,58	0,29	-8,5	8,5
50	0,19	-12,4	6,38	0,25	-10	10
60	0,17	-13	6,98	0,215	-11	11
70	0,16	-13,5	7,48	0,195	-12	12
80	0,15	-14,5	8,48	0,18	-12,8	12,8
90	0,14	-15	8,98	0,17	-13,5	13,5
98	0,14	-15	8,98	0,17	-13,5	13,5
100	0,14	-15	8,98	0,17	-13,5	13,5
120	0,13	-15,5	9,48	0,155	-14	14
156	0,12	-16	9,98	0,155	-14	14
213	0,12	-16	9,98	0,175	-13	13

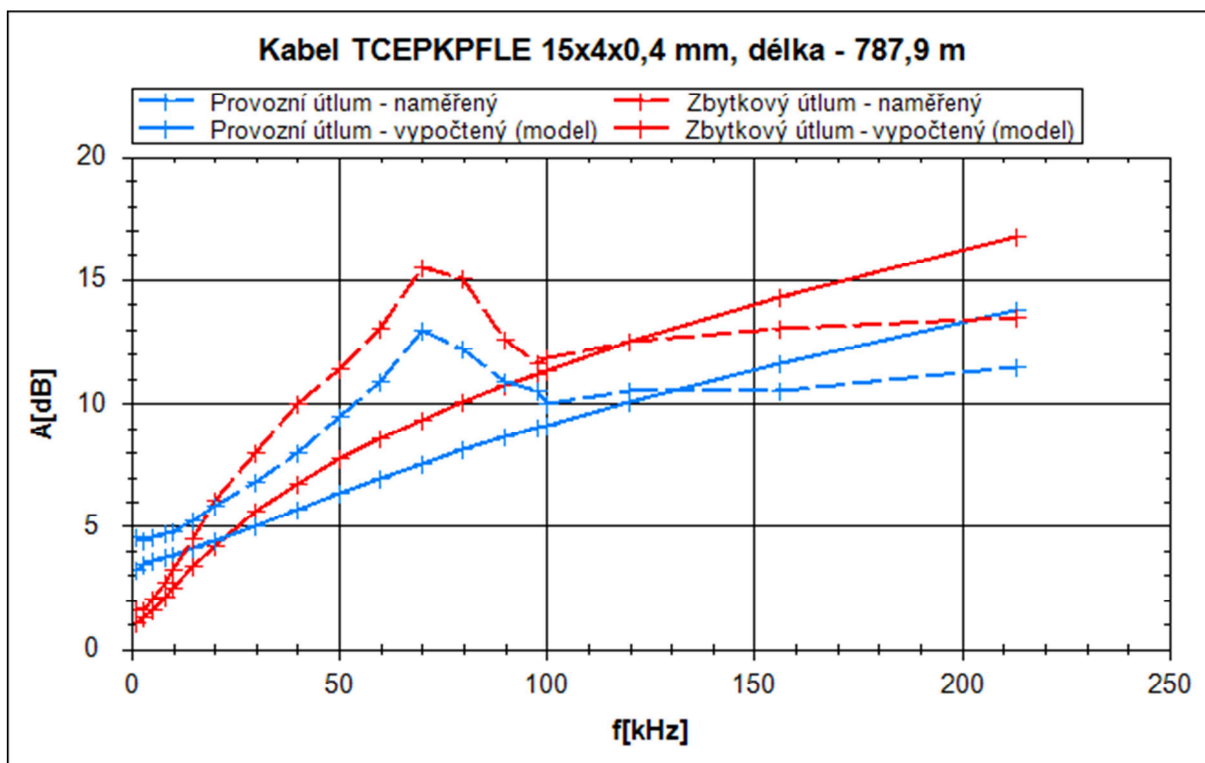
Tabulka 4: Naměřené hodnoty provozního a zbytkového útlumu, kabel SYKFY 2x2x0,5 mm

## 5 Porovnání modelu s naměřenými hodnotami

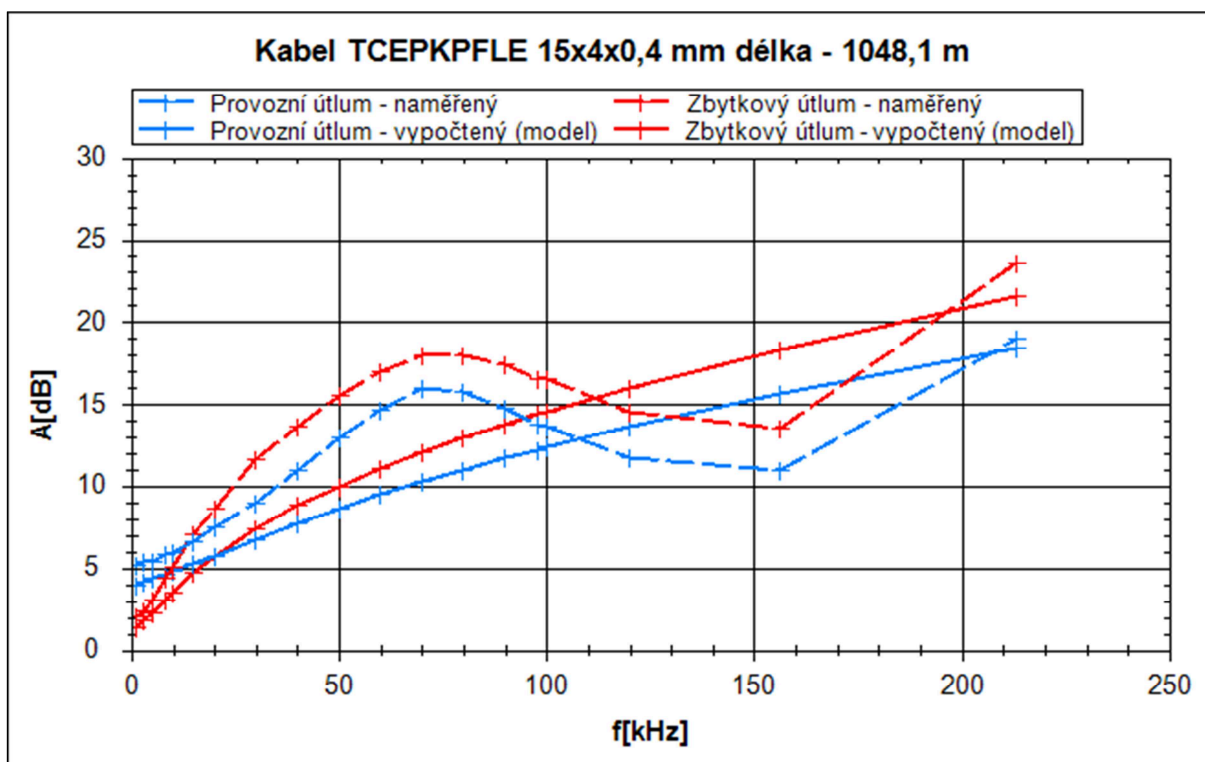
Kapitola se zabývá srovnáním naměřených a vypočtených hodnot, které prezentujeme ve formě grafů, prostřednictvím námi vytvořeného programu.

Po sestavení programu, byly zadány naměřené hodnoty napěťové úrovně  $L_2$ , pro výpočet a zobrazení naměřených hodnot provozního a zbytkového útlumu. Pro zobrazení a výpočet matematického modelu, byly zadány: zátěž  $Z_2$ , délka  $l$ , odpor  $R$ , kapacita  $C$  a rovnice regresní křivky vlnové impedance  $Z_0$ . Výstupem programu jsou grafy zkoumaných kabelů (TCEPKPFLE 15x4x0,4 mm a SYKFY 2x2x0,5 mm), ve kterých srovnáváme frekvenční charakteristiky útlumů získaných měření s frekvenčními charakteristikami útlumů stanovených z matematického modelu, viz obr. 15, 16, 17, 18, 19, 20.

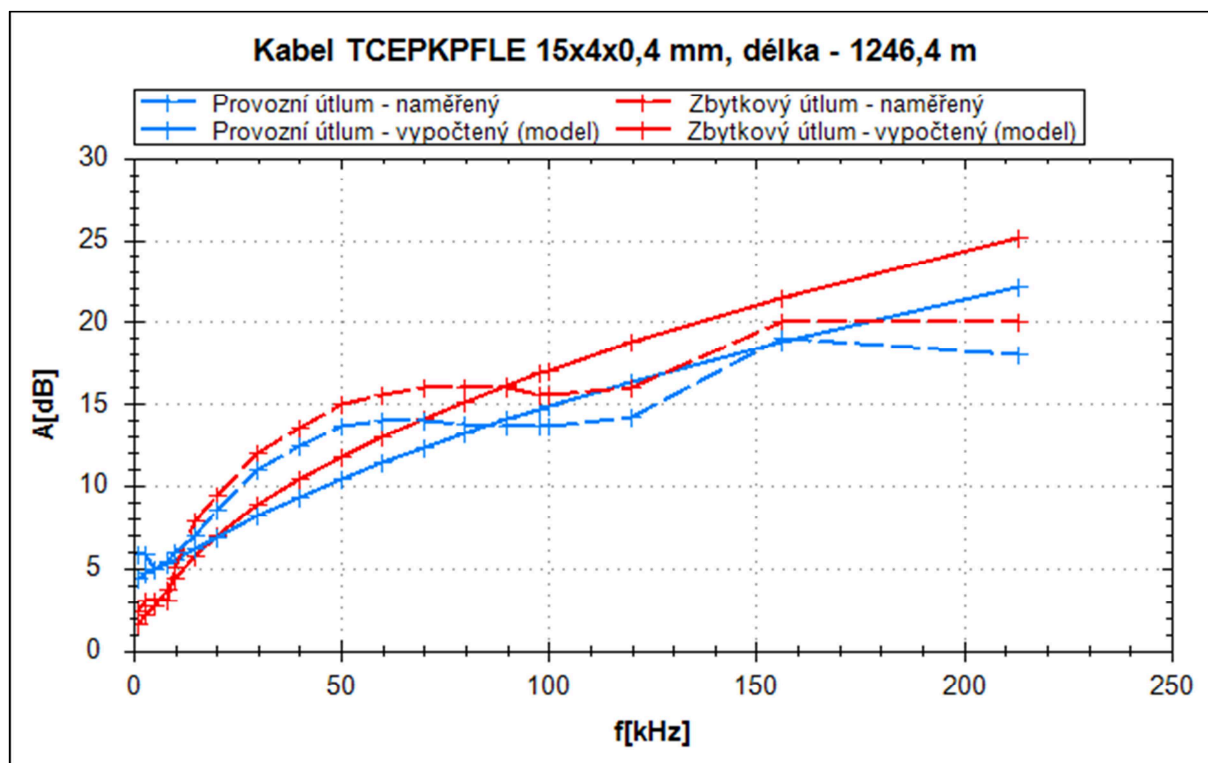
Správnost výsledků matematického modelu, byly ověřeny v programu Microsoft Excel a Maple. Kdy při stejných vstupních datech nám vyšel stejný výsledek, tím byla ověřena správnost napsaného programu. Pro porovnání a kontrolu výstupu sestaveného programu, jsou v Příloze C uvedeny grafy z Microsoft Excelu.



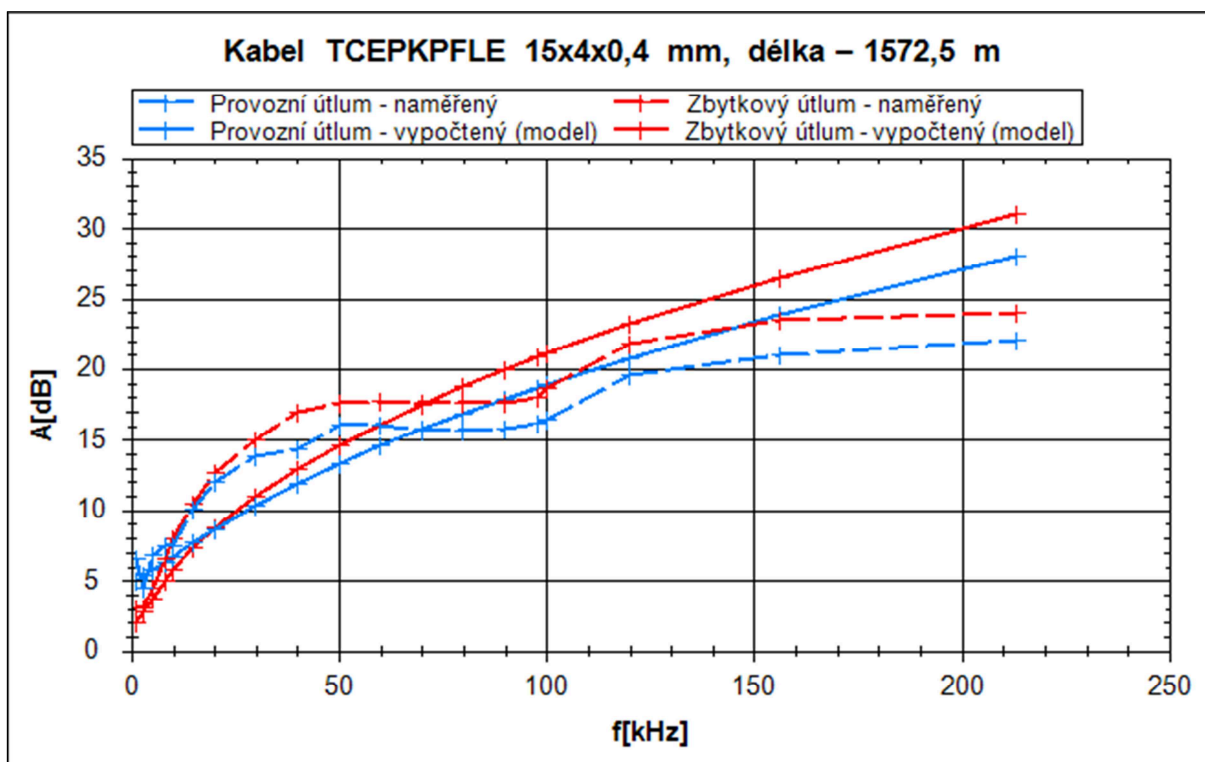
Obr. 15: Srovnání naměřených a vypočtených hodnot provozního a zbytkového útlumu pomocí programu



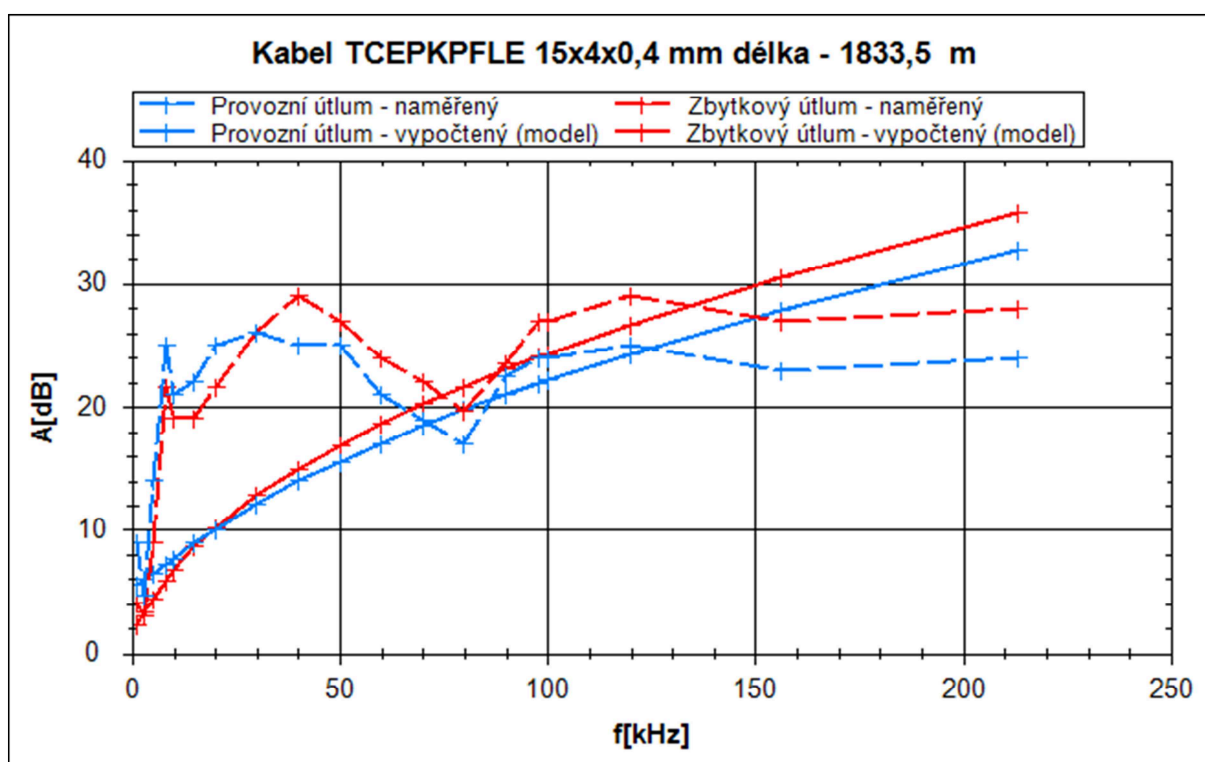
Obr. 16: Srovnání naměřených a vypočtených hodnot provozního a zbytkového útlumu pomocí programu



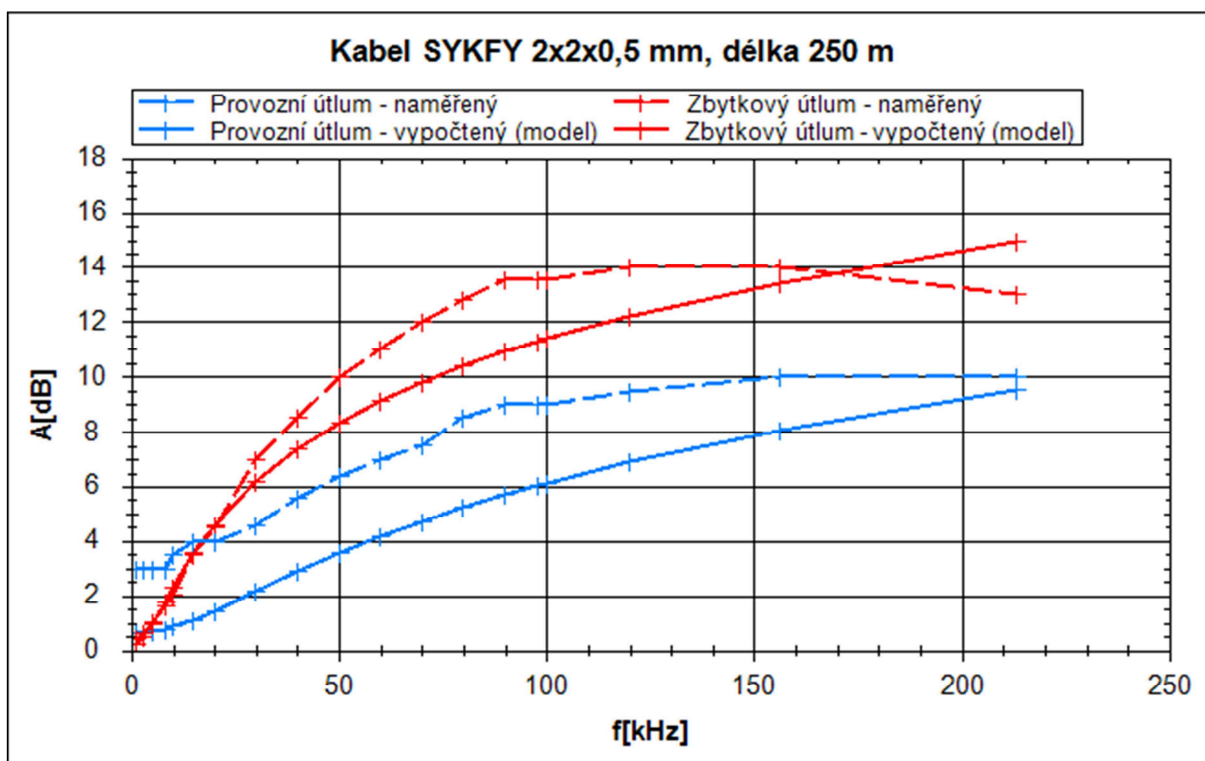
Obr. 17: Srovnání naměřených a vypočtených hodnot provozního a zbytkového útlumu pomocí programu



Obr. 18: Srovnání naměřených a vypočtených hodnot provozního a zbytkového útlumu pomocí programu



Obr. 19: Srovnání naměřených a vypočtených hodnot provozního a zbytkového útlumu pomocí programu



Obr. 20: Srovnání naměřených a vypočtených hodnot provozního a zbytkového útlumu pomocí programu

## 6 Zhodnocení a závěr

Závěrem této bakalářské práce se ohlédneme za dosaženými výsledky a provedeme krátké zhodnocení toho, čím je tato práce přínosná a jak se dá prakticky využít. Tato bakalářská práce měla souhrnně a na příkladech nastínit problematiku telekomunikačních vedení a jejich parametrů, které jsou pro plánování kvalitních telekomunikačních spojů nezbytné.

Tvorba matematického modelu byla poměrně náročná. Vycházel jsem z vlastního měření v laboratoři a vztahů pro výpočty primárních a sekundárních parametrů, vstupní impedance a útlumů. Model byl ověřen pro dva typy vedení. Ze zjištěných hodnot můžeme tvrdit, že pro elektricky krátká vedení (kabel SYKFY 2x2x0,4 mm) vycházíme při výpočtech z primárních parametrů vedení, odporu  $R$  a kapacity  $C$ , na základě kterých určujeme vlnovou impedanci a měrnou míru přenosu. U elektricky dlouhých vedení (TCEPKPFLE 15x4x0,4 mm) určujeme z primárních parametrů pouze měrnou míru přenosu. Vlnovou impedanci jsme zjistili měřením vstupní impedance vedení naprázdno a nakrátko. Tyto postupy nám zaručovali nejvěrohodnější průběh modelu a jeho srovnání s naměřenými hodnotami provozního a zbytkového útlumu.

U kabelu TCEPKPFLE 15x4x0,4 mm, při měření zbytkového i provozního útlumu nám hodnoty útlumů rostly, i navzdory mírnému poklesu, který se projevoval kolem frekvence 80 kHz, platí to hlavně pro délky 787,9m a 1048,1m. Tento jev se vyskytl i při opakovaném měření s jinými přístroji. Byl zřejmě způsobem tím, že měřené vedení není vcelku a projevují se při měření nehomogenity. U délky 1833,5 m, bylo měření náročné a ne tolik přesné, nešlo přesně odečíst stále se měnící hodnoty. Proto bych měření pro tuto délku bral spíše orientačně. Nejvěrohodněji jsme se s modelem přiblížili u délek mezi 1200 – 1600 m. Naměřené a vypočtené průběhy vidíme v grafech, viz kapitola 5, popř. příloha C.

U kabelu SYKFY 2x2x0,4 mm, provozní i zbytkový útlum strmě rostl a nedocházelo k jeho poklesu (kabel je vcelku a neprojevují se u něj nehomogenity).

Z matematického modelu i z měření napěťových úrovní obou typů kabelů vyplývá:

- 1) Zbytkový útlum je ve frekvenčním pásmu od 20 kHz vždy větší než provozní, u modelu i samotného měření.
- 2) S rostoucím kmitočtem provozní i zbytkový útlum roste
- 3) Rostoucí délka kabelů má za následek zvyšující se útlum

Při tvorbě matematického modelu byl zanedbán vliv vzrůstajícího odporu při zvětšující se frekvenci. Vytvořený model byl ověřen pro frekvenční pásmo 1 – 213 kHz.

Tyto závěry však platí jen pro výše uvedené typy kabelu SYKFY 2x2x0,4 mm a TCEPKPFLE 15x4x0,4 mm. Nebylo v našich možnostech ověřit tento postup pro jiné typy kabelů.

Přínosem této bakalářské práce jsou desítky hodin strávených příjemnou prací v laboratoři, na jejímž základě jsem získal mnoho naměřených hodnot a byl schopen sestavit matematický model. Jako další přínos bych vyzdvihnul práci s Microsoft Visual Studií 2010 a komponentou pro zobrazování grafů ZedGraph. V neposlední řadě i zpracování všech naměřených hodnot a implementování vzorců v programu Microsoft Excel.

Výsledky této práce by mohli být inspirací a základem pro další měření útlumů ve vyšších kmitočtových pásmech. Postupy, jimiž se zde zabýváme, bychom mohli ověřit pro další typy kabelů a tím dále otestovat sestavený model a program.

# Literatura

[1]CSHARP [online]. [cit. 2012-04-17]. Dostupné z: <http://csharp.aspone.cz/>

[2]KABELOVNA [online].[cit.2012-04-17]

Dostupné z: [http://www.kabelovna.cz/produkty/1\\_telekomunikacni-kabely](http://www.kabelovna.cz/produkty/1_telekomunikacni-kabely)

[3]KIJONKA A KOL., Jaromír. *Teorie obvodů II*. VŠB – Technická univerzita Ostrava: VŠB – TUO, 2007. 157 s.

[4]MYSLÍK, CSC., Doc. Ing. Jiří. *Řešené příklady z analýzy elektrických obvodů*. Spálená 51, 113 02 Praha 1 : Vydalo SNTL - nakladatelství technické literatury, 1984. 288 s.

[5]SCHLITTER, M.: *Telekomunikační vedení*, ČVUT Praha, 1995.

[6]SVOBODA, CSC., Doc. Ing. Jaroslav; ŠIMÁK, CSC., Doc. Ing. Boris; ZEMAN, Ing. Tomáš. *Základy teleinformatiky*. 1. vyd. Žikova 4, 16636 Praha 6 : ČVUT, 2000. 192 s. ISBN 80-01-01767-2

[7]Škop, M.- Petrásek, M.- Sobotka, V. a kol. *Telekomunikační přenosová technika. Skripta. Praha: ČVUT, 1991*

[8]ZedGraph\_CODEPROJECT [online][cit.20120417].Dostupnéz:<http://www.codeproject.com/Articles/5431/A-flexible-charting-library-for-NET>



# Seznam příloh

Příloha A – Tabulky naměřených a vypočtených hodnot .....	1-7
Příloha B – Měření vstupní impedance .....	1-2
Příloha C – Porovnání naměřených a vypočtených hodnot, grafy Microsoft Excelu .....	1-3

## Seznam příloh umístěných na CD

Příloha D - Projekt s instalačkou aplikace pro výpočet provozního a zbytkového útlumu s realizací matematického modelu pod názvem - „aplikace\_utlumpy.zip“.

Příloha E – Zdrojové kódy z Microsoft Visual Studia pod názvem – „aplikace\_visual\_studio.zip“.

Příloha F - Uživatelská příručka pod názvem - „uzivatelska\_prirucka.pdf“.

Příloha G - Programátorská příručka pod názvem - „programatorska\_prirucka.pdf“.

## Příloha A

	Vedení naprázdno			Vedení nakrátko			Vlnová impedance	komplexní tvar vlnové impedance
<b>f</b>	<b>U<sub>1</sub></b>	<b>L<sub>1</sub></b>	<b>Z<sub>10</sub></b>	<b>U<sub>1</sub></b>	<b>L<sub>1</sub></b>	<b>Z<sub>1K</sub></b>	<b>Z<sub>0</sub></b>	<b>Z<sub>0</sub></b>
[kHz]	[V]	[dBm]	[Ω]	[V]	[dBm]	[Ω]	[Ω]	[Ω]
<b>1</b>	1,5	4,2	2573	0,44	-5	234	776	550-500i
<b>3</b>	1,4	4,1	2425	0,44	-5	235	755	534-534i
<b>5</b>	1,2	4	2291	0,44	-5	235	734	519-519i
<b>8</b>	0,95	1,7	931	0,44	-5	235	468	331-331i
<b>10</b>	0,85	1	767	0,46	-4,5	254	441	312-312i
<b>15</b>	0,62	-2	395	0,48	-4,5	254	317	224-224i
<b>20</b>	0,48	-4,2	267	0,46	-3	329	296	209-209i
<b>30</b>	0,32	-7,5	160	0,5	-3,7	291	216	153-153i
<b>40</b>	0,26	-9,4	122	0,5	-3,5	301	192	136-136i
<b>50</b>	0,25	-9,8	116	0,46	-4,5	254	172	122-122i
<b>60</b>	0,275	-9	129	0,4	-5,5	217	167	118-118i
<b>70</b>	0,32	-7,6	158	0,31	-7,5	160	159	112-112i
<b>80</b>	0,36	-6,5	186	0,28	-9	129	155	110-110i
<b>90</b>	0,4	-6	201	0,24	-10	113	151	107-107i
<b>98</b>	0,4	-6	201	0,26	-9,5	121	156	110-110i
<b>100</b>	0,4	-6	201	0,23	-10,4	107	147	104-104i
<b>120</b>	0,32	-7,6	158	0,29	-8,6	137	147	104-104i
<b>156</b>	0,23	-10,4	107	0,36	-7	173	136	96-96i
<b>213</b>	0,325	-7,4	163	0,22	-10	113	136	96-96i

Tabulka 1: Naměřené hodnoty vstupní impedance naprázdno a nakrátko, kabel TCEPKPFLE 15x4x0,4 mm

TCEPKPFLE 15x4x0,4 mm																														
	Délka vedení = 787,9 m						Délka vedení = 1048,1 m						Délka vedení = 1246,4 m						Délka vedení = 1572,5 m						Délka vedení = 1833,5 m					
	Provozní útlum			Zbytkový útlum			Provozní útlum			Zbytkový útlum			Provozní útlum			Zbytkový útlum			Provozní útlum			Zbytkový útlum			Provozní útlum			Zbytkový útlum		
f	U <sub>2</sub>	L <sub>2</sub>	A	U <sub>2</sub>	L <sub>2</sub>	A	U <sub>2</sub>	L <sub>2</sub>	A	U <sub>2</sub>	L <sub>2</sub>	A	U <sub>2</sub>	L <sub>2</sub>	A	U <sub>2</sub>	L <sub>2</sub>	A	U <sub>2</sub>	L <sub>2</sub>	A	U <sub>2</sub>	L <sub>2</sub>	A	U <sub>2</sub>	L <sub>2</sub>	A			
[kHz]	[V]	[dBm]	[dB]	[V]	[dBm]	[dB]	[V]	[dBm]	[dB]	[V]	[dBm]	[dB]	[V]	[dBm]	[dB]	[V]	[dBm]	[dB]	[V]	[dBm]	[dB]	[V]	[dBm]	[dB]	[V]	[dBm]	[dB]			
1	0,23	-10,6	4,58	0,65	-1,6	1,6	0,21	-11,2	5,18	0,61	-2	2	0,2	-11,8	5,78	0,58	-2,4	2,4	0,18	-12,6	6,58	0,55	-3	3	0,14	-15	8,98	0,48	-4	4
3	0,235	-10,4	4,38	0,65	-1,6	1,6	0,21	-11,4	5,38	0,58	-2,4	2,4	0,2	-11,8	5,78	0,56	-3	3	0,21	-10,4	4,38	0,55	-3	3	0,23	-10,6	4,58	0,56	-3	3
5	0,23	-10,6	4,58	0,62	-2	2	0,21	-11,4	5,38	0,55	-3	3	0,22	-11	4,98	0,56	-3	3	0,175	-12,8	6,78	0,46	-4,5	4,5	0,078	-20	13,98	0,28	-9	9
8	0,225	-10,7	4,68	0,55	-2,7	2,7	0,2	-11,8	5,78	0,48	-4,4	4,4	0,21	-11,4	5,38	0,56	-3	3	0,16	-13,5	7,48	0,36	-6,5	6,5	0,027	-31	24,98	0,064	-21,6	21,6
10	0,22	-10,8	4,78	0,54	-3,2	3,2	0,195	-12	5,98	0,44	-5	5	0,19	-12	5,98	0,44	-5	5	0,16	-13,5	7,48	0,32	-8	8	0,023	-27	20,98	0,086	-19	19
15	0,21	-11,2	5,18	0,46	-4,5	4,5	0,18	-12,6	6,58	0,36	-7	7	0,17	-13	6,98	0,335	-7,8	7,8	0,12	-16	9,98	0,23	-10,4	10,4	0,034	-28	21,98	0,086	-19	19
20	0,2	-11,8	5,78	0,38	-6	6	0,17	-13,5	7,48	0,29	-8,6	8,6	0,15	-14,5	8,48	0,26	-9,4	9,4	0,1	-18	11,98	0,18	-12,6	12,6	0,031	-31	24,98	0,064	-21,6	21,6
30	0,18	-12,8	6,78	0,3	-8	8	0,14	-15	8,98	0,2	-11,6	11,6	0,11	-17	10,98	0,195	-12	12	0,08	-19,8	13,78	0,14	-15	15	0,021	-32	25,98	0,038	-26	26
40	0,15	-14	7,98	0,25	-10	10	0,109	-17	10,98	0,16	-13,6	13,6	0,094	-18,4	12,38	0,16	-13,5	13,5	0,066	-20,4	14,38	0,11	-17	17	0,018	-31	24,98	0,028	-29	29
50	0,13	-15,5	9,48	0,21	-11,4	11,4	0,089	-19	12,98	0,13	-15,5	15,5	0,082	-19,6	13,58	0,14	-15	15	0,062	-22	15,98	0,102	-17,6	17,6	0,022	-31	24,98	0,034	-27	27
60	0,11	-16,9	10,88	0,17	-13	13	0,071	-20,6	14,58	0,11	-17	17	0,078	-20	13,98	0,13	-15,5	15,5	0,062	-22	15,98	0,1	-17,7	17,7	0,034	-27	20,98	0,048	-24	24
70	0,086	-19	12,98	0,13	-15,5	15,5	0,062	-22	15,98	0,098	-18	18	0,078	-20	13,98	0,125	-16	16	0,064	-21,6	15,58	0,102	-17,6	17,6	0,042	-25	18,98	0,06	-22	22
80	0,094	-18,2	12,18	0,14	-15	15	0,064	-21,8	15,78	0,098	-18	18	0,08	-19,8	13,78	0,125	-16	16	0,064	-21,6	15,58	0,102	-17,6	17,6	0,056	-23	16,98	0,08	-19,6	19,6
90	0,11	-16,9	10,88	0,18	-12,6	12,6	0,07	-20,8	14,78	0,104	-17,4	17,4	0,082	-19,6	13,58	0,125	-16	16	0,062	-21,8	15,78	0,102	-17,6	17,6	0,03	-28,5	22,48	0,052	-23,5	23,5
98	0,12	-16,5	10,48	0,2	-11,6	11,6	0,078	-19,8	13,78	0,11	-16,5	16,5	0,082	-19,6	13,58	0,13	-15,5	15,5	0,06	-22,2	16,18	0,096	-18	18	0,024	-30	23,98	0,034	-27	27
100	0,14	-16	9,98	0,2	-11,8	11,8	0,08	-19,6	13,58	0,11	-16,5	16,5	0,082	-19,6	13,58	0,13	-15,5	15,5	0,58	-22,4	16,38	0,09	-18,6	18,6	0,025	-30	23,98	0,034	-27	27
120	0,12	-16,5	10,48	0,19	-12,5	12,5	0,1	-17,8	11,78	0,15	-14,5	14,5	0,076	-20,2	14,18	0,125	-16	16	0,042	-25,5	19,48	0,064	-21,8	21,8	0,022	-31	24,98	0,028	-29	29
156	0,12	-16,5	10,48	0,17	-13	13	0,11	-17	10,98	0,165	-13,5	13,5	0,044	-25	18,98	0,075	-20	20	0,034	-27	20,98	0,05	-23,5	23,5	0,025	-29	22,98	0,036	-27	27
213	0,1	-17,5	11,48	0,16	-13,5	13,5	0,044	-25	18,98	0,052	-23,5	23,5	0,05	-24	17,98	0,075	-20	20	0,03	-28	21,98	0,048	-24	24	0,024	-30	23,98	0,034	-28	28

Tabulka 2: Naměřené hodnoty provozního a zbytkového útlumu jednotlivých délek vedení, kabel TCEPKPFLE 15x4x0,4 mm

			Provozní útlum		Zbytkový útlum	
f	$\bar{\gamma} \cdot l$	$\bar{\gamma} \cdot l$ komplexní číslo	Z <sub>1</sub>	A model	Z <sub>1</sub>	A model
[kHz]	[-]	[-]	[Ω]	[dB]	[Ω]	[dB]
1	0,113	0,113+0,113j	313	3,20	759	1,07
3	0,196	0,196+0,196j	328	3,43	750	1,30
5	0,252	0,252+0,252j	333	3,56	717	1,59
8	0,319	0,319+0,319j	336	3,73	652	2,09
10	0,357	0,357+0,357j	335	3,83	607	2,46
15	0,437	0,437+0,437j	329	4,10	506	3,36
20	0,505	0,505+0,505j	318	4,40	428	4,18
30	0,618	0,618+0,618j	290	5,00	326	5,59
40	0,714	0,714+0,714j	262	5,69	264	6,74
50	0,798	0,798+0,798j	237	6,33	225	7,71
60	0,874	0,874+0,874j	216	6,94	198	8,57
70	0,945	0,945+0,945j	198	7,53	178	9,34
80	1,010	1,010+1,010j	183	8,10	164	10,05
90	1,071	1,071j+1,071j	171	8,61	152	10,71
98	1,118	1,118+1,118j	163	9,02	145	11,21
100	1,129	1,129+1,129j	161	9,112	144	11,33
120	1,237	1,237+1,237j	145	10,06	131	12,47
156	1,410	1,410+1,410j	125	11,604	116	14,30
213	1,648	1,648+1,648j	108	13,75	104	16,77

Tabulka 3: Vypočtené hodnoty provozního a zbytkového útlumu (matematický model), kabel TCEPKPFLE

15x4x0,4 mm, l = 787,9 m

			Provozní útlum		Zbytkový útlum	
f	$\bar{\gamma} \cdot l$	$\bar{\gamma} \cdot l$ komplexní číslo	Z <sub>1</sub>	A model	Z <sub>1</sub>	A model
[kHz]	[-]	[-]	[Ω]	[dB]	[Ω]	[dB]
1	0,150	0,150+0,150j	367	3,89	809	1,38
3	0,260	0,260+0,260j	385	4,17	782	1,76
5	0,336	0,336+0,336j	390	4,35	722	2,23
8	0,425	0,425+0,425i	388	4,60	622	3,01
10	0,475	0,475+0,475j	383	4,78	562	3,53
15	0,582	0,582+0,582j	362	5,24	447	4,72
20	0,672	0,672+0,672j	338	5,74	369	5,75
30	0,823	0,823+0,823j	290	6,76	278	7,43
40	0,950	0,950+0,950j	252	7,73	229	8,80
50	1,062	1,062+1,062j	223	8,63	199	9,98
60	1,163	1,163+1,163j	201	9,47	179	11,04
70	1,256	1,256+1,256j	184	10,25	165	12,01
80	1,343	1,343+1,343j	170	10,99	155	12,91
90	1,425	1,425+1,425j	160	11,69	148	13,75
98	1,487	1,487+1,487j	153	12,23	143	14,39
100	1,502	1,502+1,502j	151	12,36	141	14,54
120	1,645	1,645+1,645j	138	13,61	132	16,01
156	1,876	1,876+1,876j	123	15,65	121	18,35
213	2,192	2,192+2,192j	109	18,47	109	21,50

Tabulka 4: Vypočtené hodnoty provozního a zbytkového útlumu (matematický model), kabel TCEPKPFLE

15x4x0,4 mm, l = 1048,1 m

f	$\bar{\gamma} \cdot l$	$\bar{\gamma} \cdot l$ komplexní číslo	Provozní útlum		Zbytkový útlum	
			$Z_1$	A model	$Z_1$	A model
[kHz]	[-]	[-]	[ $\Omega$ ]	[dB]	[ $\Omega$ ]	[dB]
1	0,179	0,179+0,179j	407	4,36	846	1,62
3	0,309	0,309+0,309j	427	4,67	800	2,12
5	0,399	0,399+0,399j	430	4,90	717	2,75
8	0,505	0,505+0,505j	421	5,24	595	3,73
10	0,565	0,565+0,565j	411	5,49	529	4,35
15	0,692	0,692+0,692j	377	6,14	411	5,73
20	0,799	0,799+0,799j	342	6,81	338	6,89
30	0,9781	0,978+0,978j	283	8,11	258	8,780
40	1,129	1,129+1,129j	242	9,30	216	10,34
50	1,263	1,263+1,263j	213	10,39	192	11,71
60	1,383	1,383+1,383j	192	11,39	176	12,94
70	1,494	1,494+1,494j	177	12,32	165	14,07
80	1,597	1,597+1,597j	166	13,20	157	15,11
90	1,694	1,694+1,694j	156	14,03	150	16,09
98	1,768	1,767+1,768j	150	14,67	146	16,83
100	1,786	1,785+1,7859j	149	14,82	145	17,01
120	1,956	1,956+1,956j	138	16,31	136	18,72
156	2,231	2,231+2,231j	124	18,73	124	21,43
213	2,606	2,606+2,606j	110	22,07	110	25,11

Tabulka 5: Vypočtené hodnoty provozního a zbytkového útlumu (matematický model), kabel TCEPKPFLE

15x4x0,4 mm, l = 1246,4 m

			Provozní útlum		Zbytkový útlum	
f	$\bar{\gamma} \cdot l$	$\bar{\gamma} \cdot l$ komplexní číslo	Z <sub>1</sub>	A model	Z <sub>1</sub>	A model
[kHz]	[-]	[-]	[Ω]	[dB]	[Ω]	[dB]
1	0,225	0,225+0,225j	474	5,03	904	1,99
3	0,390	0,390+0,390j	494	5,42	817	2,75
5	0,504	0,504+0,504j	489	5,75	697	3,64
8	0,637	0,637+0,637j	463	6,29	551	4,92
10	0,7125	0,713+0,713j	440	6,67	481	5,69
15	0,873	0,873+0,873j	383	7,66	369	7,34
20	1,008	1,008+1,008j	335	8,61	306	8,71
30	1,234	1,230+1,230j	269	10,34	242	10,99
40	1,425	1,425+1,425j	229	11,88	210	12,89
50	1,593	1,593+1,593j	203	13,26	191	14,57
60	1,745	1,745+1,745j	186	14,53	179	16,08
70	1,885	1,89+1,889j	173	15,72	169	17,46
80	2,015	2,015+2,015j	163	16,83	162	18,75
90	2,137	2,137+2,137j	156	17,88	155	19,94
98	2,230	2,230+2,230j	150	18,69	150	20,85
100	2,253	2,253+2,253j	149	18,88	149	21,07
120	2,468	2,468+2,468j	139	20,76	139	23,16
156	2,814	2,814+2,814j	125	23,80	125	26,50
213	3,288	3,288+3,288j	110	28,00	110	31,03

Tabulka 6: Vypočtené hodnoty provozního a zbytkového útlumu (matematický model), kabel TCEPKPFLE

15x4x0,4 mm, l = 1572,5 m

			Provozní útlum		Zbytkový útlum	
f	$\bar{\gamma} \cdot l$	$\bar{\gamma} \cdot l$ komplexní číslo	$Z_1$	A model	$Z_1$	A model
[kHz]	[-]	[-]	[ $\Omega$ ]	[dB]	[ $\Omega$ ]	[dB]
1	0,263	0,263+0,263j	527	5,50	947	2,28
3	0,455	0,455+0,455j	543	5,97	822	3,27
5	0,587	0,587+0,587j	527	6,42	675	4,37
8	0,743	0,743+0,743j	483	7,15	519	5,87
10	0,831	0,831+0,831j	450	7,66	451	6,75
15	1,017	1,017+1,017j	378	8,90	348	8,60
20	1,175	1,175+1,175j	325	10,07	293	10,16
30	1,439	1,439+1,439j	259	12,13	238	12,76
40	1,661	1,661+1,661j	223	13,93	211	14,95
50	1,858	1,858+1,858j	200	15,56	195	16,87
60	2,035	2,035+2,035j	184	17,05	182	18,60
70	2,198	2,198+2,198j	173	18,43	173	20,18
80	2,350	2,350+2,350j	164	19,73	164	21,65
90	2,492	2,492+2,492j	156	20,96	157	23,03
98	2,601	2,601+2,601j	151	21,90	152	24,07
100	2,627	2,630+2,630j	150	22,13	151	24,32
120	2,878	2,878+2,8778j	139	24,31	140	26,72
156	3,281	3,281+3,281j	125	27,85	125	30,56
213	3,834	3,834+3,834j	110	32,74	110	35,77

Tabulka 7: Vypočtené hodnoty provozního a zbytkového útlumu (matematický model), kabel TCEPKPFLE  
15x4x0,4 mm, l = 1833,5 m

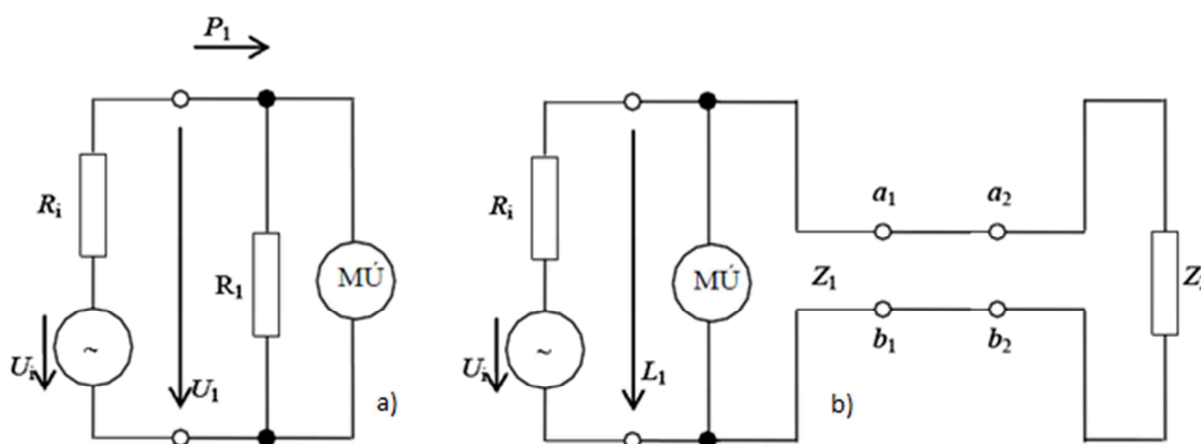


## Příloha B

Použité přístroje: generátor signálu - Metex MS-9170, měřič úrovně - Instek GVT-427B, odpory o hodnotách 150  $\Omega$  a 600  $\Omega$ .

Obvod byl zapojen dle obr. 1 a). Paralelně připojen odpor  $R_1 = 600 \Omega$ . Na generátoru nastavena hodnota vnitřního odporu  $R_i = 600 \Omega$ , frekvence  $f = 1 \text{ kHz}$  a amplituda AMP tak, aby na měřiči úrovně byla úroveň  $L_1 = 0 \text{ dBm}$ . Takto nastavená úroveň byla ponechána po celou dobu měření vstupní impedance.

Po nastavení úrovně  $L_1 = 0 \text{ dBm}$ , bylo provedeno zapojení dle obr. 1 b). Nejprve bylo měřeno vedení naprázdno a poté zkratováním konců vedení  $a_2$  a  $b_2$  měření nakrátko.



Obr. 1: Schéma pro měření vstupní impedance

### Výpočet vstupní impedance $Z_1$ z naměřených hodnot napěťové úrovně $L_1$

Popsaná metoda měření vstupní impedance se používá při zanedbatelné malé imaginární složce. Vstupní proud lze vyjádřit z obr. 1 a), (resp. z obr. 1 b), kde používáme místo odporu  $R_i$  vstupní impedanci  $Z_1$ ):

$$I_1 = \frac{U_i}{R_i + R_1} = \frac{U_1}{R_1} = \frac{U_i - U_1}{R_i} \quad [A; V, \Omega] \quad (66)$$

Vstupní impedanci vedení lze vyjádřit ze vztahu:

$$\frac{U_1}{R_1} = \frac{U_i - U_1}{R_i} \Rightarrow Z_1 = \frac{U_1}{U_i - U_1} \quad (67)$$

Rozšíříme zlomek a upravíme:

$$Z_1 = R_i \cdot \frac{U_1}{U_i - U_1} \cdot \frac{\frac{2}{U_i}}{\frac{2}{U_i}} = R_i \cdot \frac{\frac{2 \cdot U_i}{U_i}}{2 - \frac{2 \cdot U_i}{U_i}} = R_i \cdot \frac{10^{\frac{L_1}{20}}}{2 - 10^{\frac{L_1}{20}}} \quad (68)$$

Kde  $L_1$  je absolutní úroveň napětí měřená na začátku vedení

$$L_1 = 20 \log \frac{U_1}{0,775} = 20 \log \frac{2 \cdot U_1}{U_i} \quad (69)$$

Upravíme:

$$\frac{L_1}{20} = \log \frac{2 \cdot U_1}{U_i} \quad (70)$$

$$10^{\frac{L_1}{20}} = \frac{2 \cdot U_1}{U_i} \quad (71)$$

Na generátoru je při měření normálové napětí a normálový vnitřní odpor. Úroveň  $L_1$  bude při normálové zátěži nulová,  $Z_1 = R_i$ . Bude-li se měnit zátěž generátoru (připojíme vedení a různě jej zakončujeme), bude se měnit úroveň  $L_1$  a s ní i vstupní impedance vedení.

**Naprázdko:**  $f = 1 \text{ kHz}$ ,  $R_i = 600 \, \Omega$ ,  $L_1 = 4,2 \text{ dBm}$

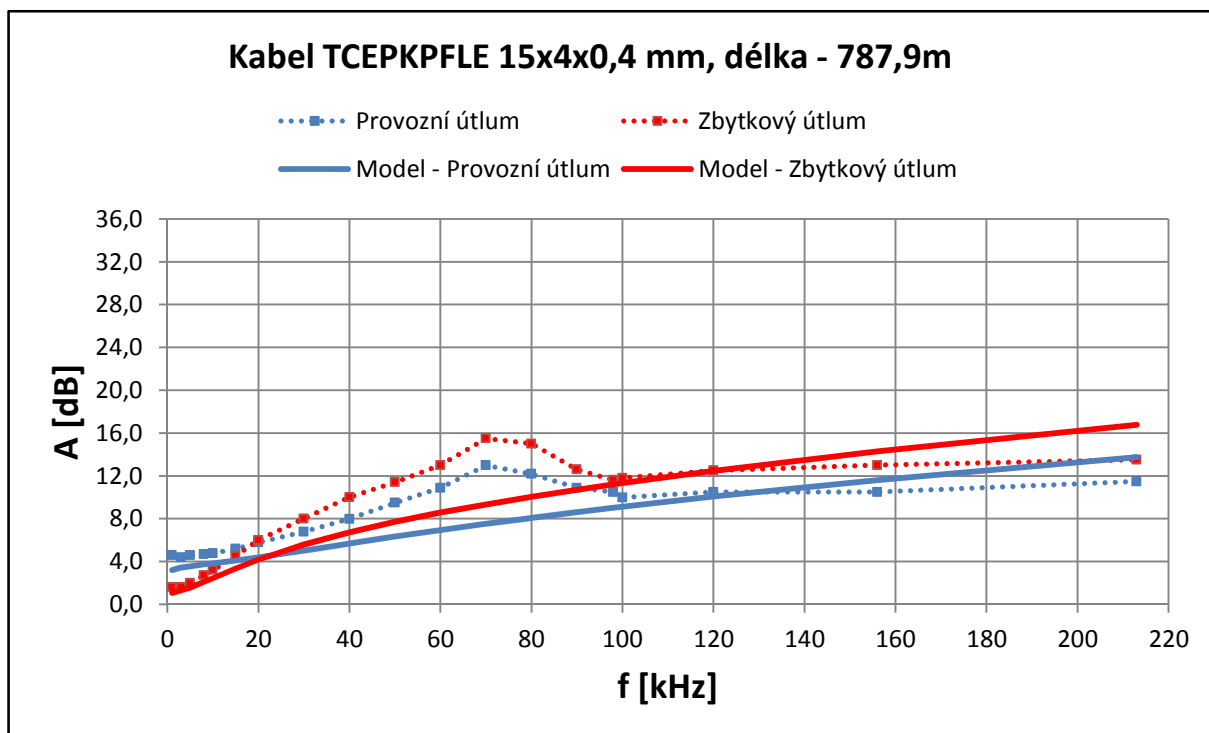
$$Z_{10} = R_i \cdot \frac{10^{\frac{L_1}{20}}}{2 - 10^{\frac{L_1}{20}}} = 600 \cdot \frac{10^{\frac{4,2}{20}}}{2 - 10^{\frac{4,2}{20}}} = 2573,009 \, \Omega \quad (72)$$

**Nakrátko:**  $f = 1 \text{ kHz}$ ,  $R_i = 600 \, \Omega$ ,  $L_1 = -5 \text{ dBm}$

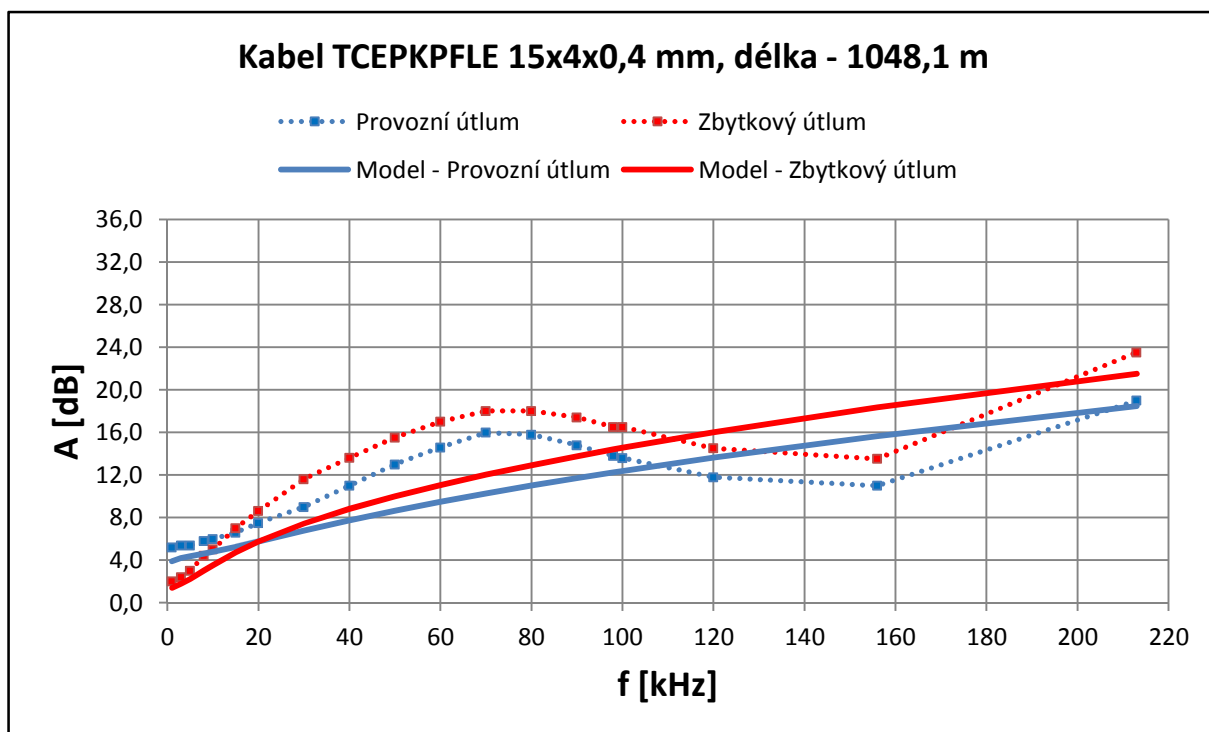
$$Z_{1K} = R_i \cdot \frac{10^{\frac{L_1}{20}}}{2 - 10^{\frac{L_1}{20}}} = 600 \cdot \frac{10^{\frac{-5}{20}}}{2 - 10^{\frac{-5}{20}}} = 234,69 \, \Omega \quad (73)$$

Viz Příloha A – Tabulka č. 1

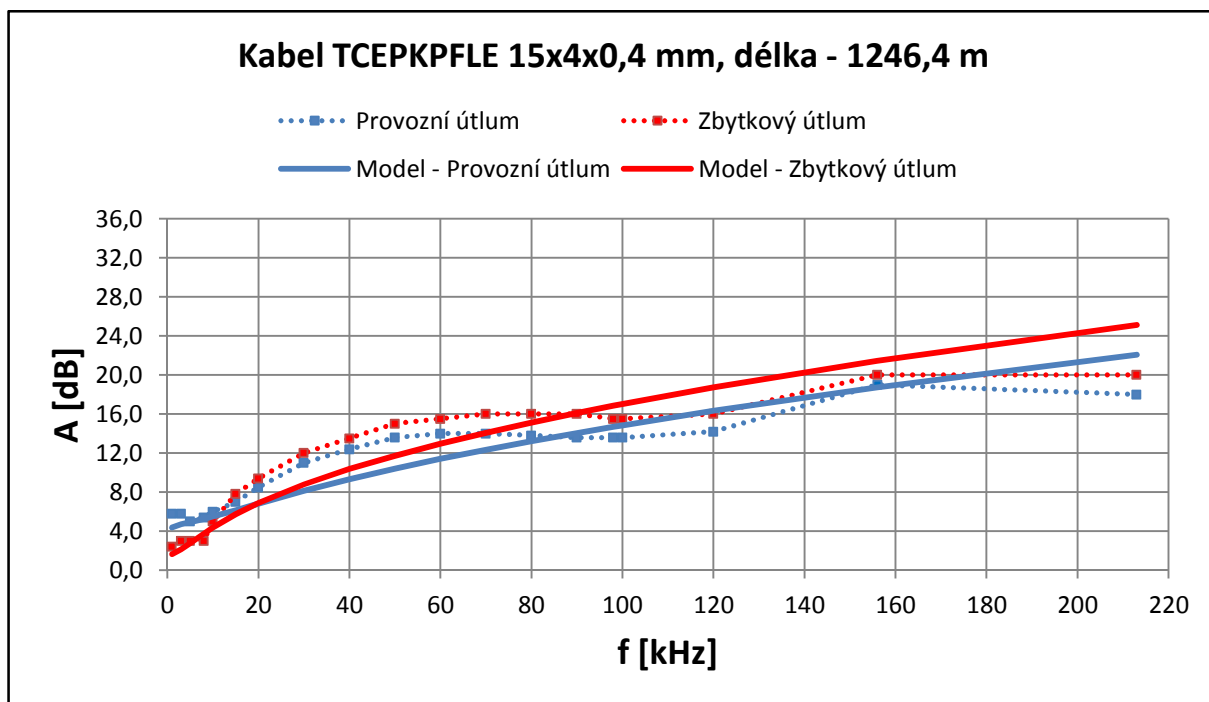
## Příloha C



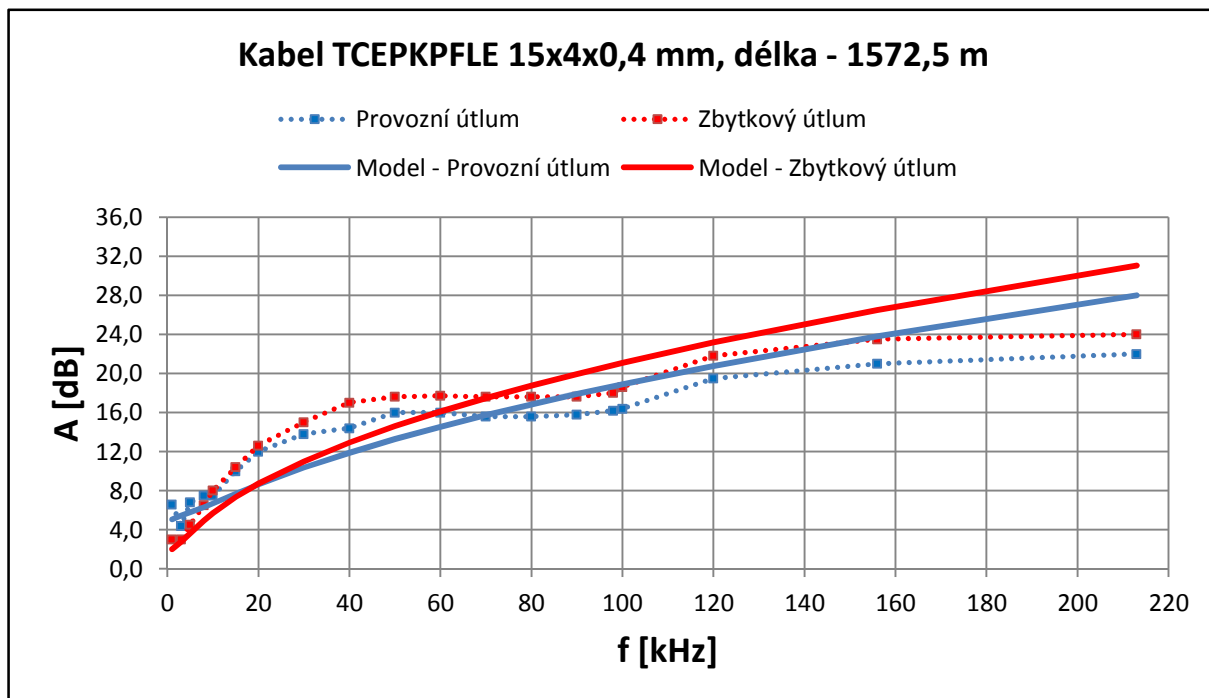
Obr. 2: Srovnání naměřených a vypočtených hodnot, kabel TCEPKPFLE 15x4x0,4 mm, délka 787,9 m



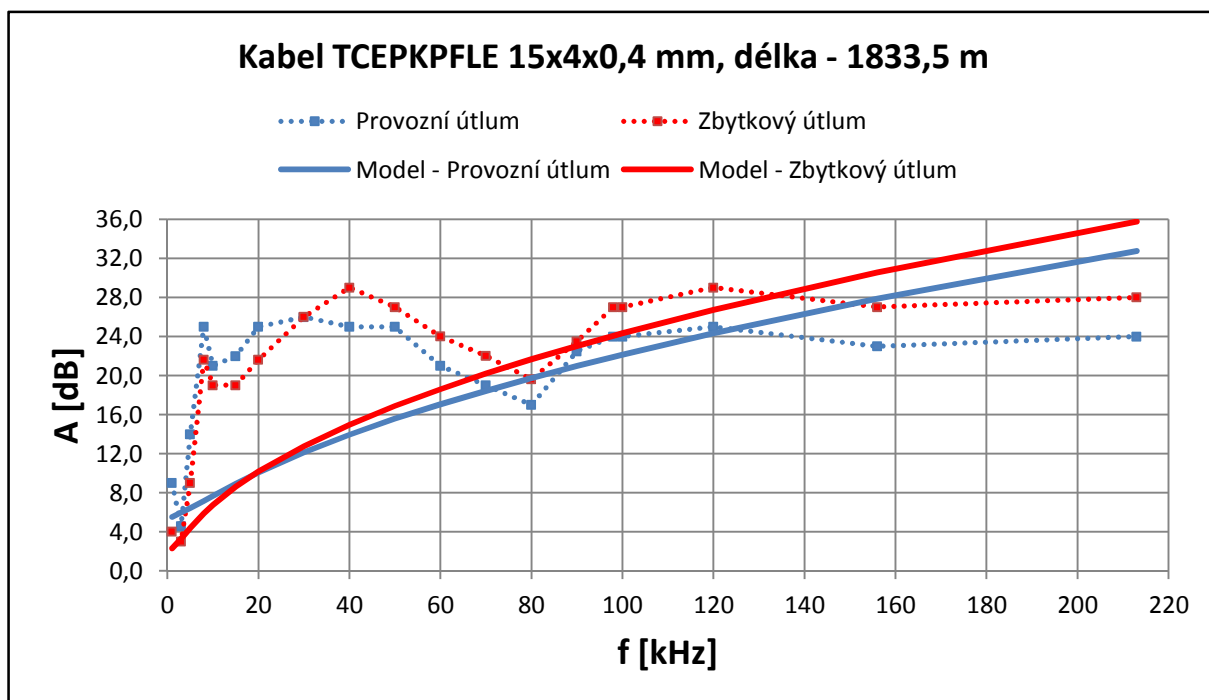
Obr. 3: Srovnání naměřených a vypočtených hodnot, kabel TCEPKPFLE 15x4x0,4 mm, délka 1048,1 m



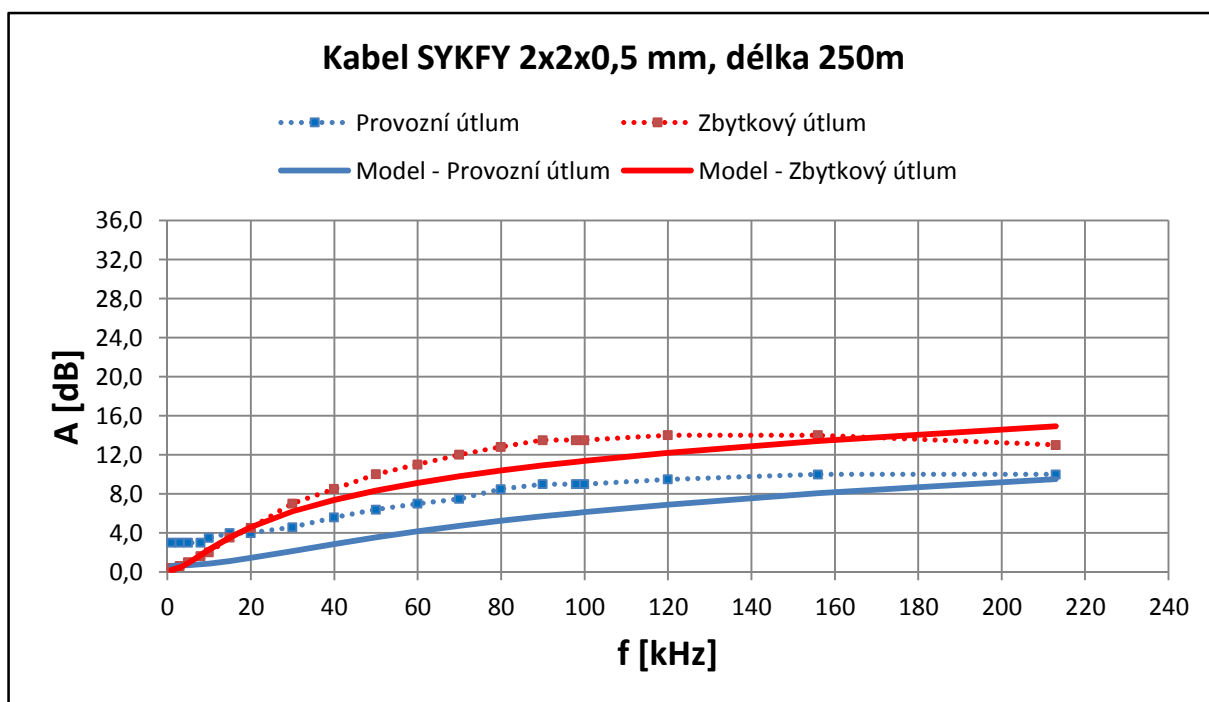
Obr. 4: Srovnání naměřených a vypočtených hodnot, kabel TCEPKPFLE 15x4x0,4 mm, délka 1246,4 m



Obr. 5: Srovnání naměřených a vypočtených hodnot, kabel TCEPKPFLE 15x4x0,4 mm, délka 1572,5 m



Obr. 6: Srovnání naměřených a vypočtených hodnot, kabel TCEPKPFLE 15x4x0,4 mm, délka 1833,5 m



Obr. 7: Srovnání naměřených a vypočtených hodnot, kabel SYKFY 2x2x0,5 mm, délka 250 m